

Edgar Serna M. (ed.)

Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era

Editorial
Instituto Antioqueño de Investigación
© 2022



Edgar Serna M. (ed.)

Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era

Edición 1

ISBN: 978-628-95135-5-4

Ingeniería y desarrollo en la nueva era / editor, Edgar Serna M. – Primera edición -- Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación, 2022.

1. recurso en línea: archivo de texto: PDF – (Ingeniería y ciencia)

Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-628-95135-5-4

1. Ingeniería - Innovaciones tecnológicas - Investigaciones 2. Investigación industrial I. Serna M., Edgar, ed. II. Serie Ingeniería y Ciencia.

CDD: 620 ed. 23

CO-BoBN- a1098657

Investigación Científica

ISBN: 978-628-95135-5-4

DOI:

Hecho el depósito legal digital

Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era

Serie: Ingeniería y Ciencia

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Edición 1: noviembre 2022

Publicación electrónica gratuita

©2022 Instituto Antioqueño de Investigación IAI™. Salvo que se indique lo contrario, el contenido de esta publicación está autorizado bajo Creative Commons Licence CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)



Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas mencionadas en el texto pertenecen a sus respectivos propietarios.

La información, hallazgos, puntos de vista y opiniones contenidos en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Instituto Antioqueño de Investigación IAI; no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este texto.

Ni el autor, ni la Editorial, ni el IAI serán responsables de los daños causados, o presuntamente causados, directa o indirectamente por el contenido en este libro.

Maquetación: Instituto Antioqueño de Investigación

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Financiado de la publicación: Instituto Antioqueño de Investigación

Instituto Antioqueño de Investigación IAI

<http://fundacioniai.org>

contacto@fundacioniai.org

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

<http://fundacioniai.org/index.php/editorial.html>

editorial@fundacioniai.org

Medellín, Antioquia



Contenido

Prólogo		ix
<i>Signo distintivo como estrategia de diferenciación: Análisis teórico a partir de un estudio de caso</i>	Catherine Lopera Estrada Juan David Henao Santa Iván Darío Rojas Arenas	1
<i>Caracterización del sector de transporte de pasajeros intermunicipal en el departamento de Santander, Colombia</i>	Luz Helena Mendoza Castro Sandra Milena Sandoval Marín	11
<i>Diseño, implementación y validación de un sistema Manufacturing Resource Planning MRP en una MiPyme del sector textil bajo un enfoque Back to Order</i>	Jhon Edward Aguirre Cuervo Silvana Ruiz Moreno Farley Albeiro Restrepo Loaiza Jim Giraldo Builes Iván Darío Rojas Arenas	21
<i>Modelación y automatización de los procesos de contratación y pago de proveedores a través de Business Process Management BPM</i>	Claudia Yadira Rodríguez Ríos María Camila Cárdenas Ruiz Katherine Andrea Muñoz Cely	33
<i>Incremento de la eficiencia del proceso de logística de distribución secundaria mediante la implementación de una plataforma de cross docking</i>	Ingleberto Enrique Castellanos-Pestana Miguel Ángel González-Curbelo	51
<i>Proceso analítico jerárquico como método para el análisis de la sostenibilidad de proyectos industriales en etapa de prefactibilidad</i>	Juan Sebastián Pérez Vallejo Mauricio Esteban Sánchez Sandra Carolina Agudelo Arbeláez Juan Carlos Cruz Jiménez	68
<i>La deontología en la Ingeniería Industrial: Un análisis comparativo entre países</i>	Ana C. Larrañaga Pastor Cristina González Gaya Carlos de Lama Burgos	79
<i>Condiciones de uso y aprovechamiento de las nuevas tecnologías en organizaciones de economía solidaria</i>	Jorge Andrés González Díaz Sandra Milena Malavera Pineda Juan Santiago Calle Piedrahita	92
<i>La gestión del riesgo integrada con la minería de procesos y la administración de procesos de negocios BPM: Una revisión de la literatura</i>	Nathaly Consuelo Pérez Moreno Elisa del Carmen Navarro Romero	104
<i>Modelo conceptual para el estudio de la relación entre las habilidades blandas del director de proyectos y el éxito de la gerencia de proyectos de consultoría ambiental</i>	Andrea Echeverry-Zuleta Daniel A. La Rotta-Forero Argenis Gamboa Santos	118
<i>Diseño de un proceso para la implementación de las 5S en una empresa prestadora de servicios a pequeña escala</i>	Paula Alejandra Peña Molina Luz Marina Herrera León Mary Luz Ordoñez Santos	133
<i>Análisis a las herramientas competitivas para el mejoramiento de la productividad a partir de una revisión de la literatura</i>	Juan Camilo Gutiérrez Sebastián García Méndez Zulay Yesenia Ramírez León	143
<i>Una propuesta de articulación de las normas NTC ISO 9001, NTC 6503 y NTSH 006 en establecimientos de alojamiento y hospedaje</i>		158

	Yuly Andrea Ujueta Castillo Diana Cristina Martínez Silva Olga Lucia Obando Vargas Hernando Camacho Camacho	
<i>Estrategias de prevención en la aparición de enfermedades osteomusculares</i>	Yuleima Esther Conrado Alarcón Cesar Alejandro García Molano	168
<i>Cómo incorporan las nuevas tecnologías las organizaciones sociales y solidarias para mejorar sus servicios</i>	Juan Santiago Calle Piedrahita Sandra Milena Malavera Pineda Julián David Colorado Agudelo	175
<i>Economía circular en Colombia: Panorama y estrategias para acelerar su implementación</i>	Juan David Carvajalino-Umaña Felipe Romero-Perdomo Mauricio López-González Natalia Ardila Miguel Ángel González-Curbelo	187
<i>Análisis de los procesos relacionados con la producción desde gestión de calidad de empresas farmacéuticas: Una revisión de la literatura</i>	Liset Dayana López Sarmiento Sylvia María Villarreal-Archila Katherine Julieth Sierra Suarez Silvia Juliana Rodríguez Mogotocoro	201
<i>Definición de método de priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento para contextos universitarios</i>	Andrea Michelle Gómez Giacomo Barbieri Luis Mario Mateus Yenny Jazmín Vanegas Gerardo Andrés Casas	213
<i>Análisis de la asimilación de las TIC en los productores del Servicio de Asesoría Técnica SAT como contribución a la transformación digital y competitividad de las empresas agrícolas familiares</i>	Carolina Giacaman Becerra	226
<i>Diseño de prototipo de destilador solar activo de doble pendiente, como método de obtención de agua potable</i>	Mauren Catalina Buelvas Rojano Roberto José Calderón Bermejo Iván Darío Rojas Arenas Nicolas Restrepo Henao	239
<i>Pequeñas centrales hidroeléctricas como alternativa para la obtención de energía en entornos rurales en Colombia: Un análisis teórico</i>	Santiago Vásquez Carmona Iván Darío Rojas Arenas Mariana Leandra Agudelo Calle José Alejandro Durango Marín	249
<i>Análisis y atención a las contingencias en el sistema eléctrico mexicano mediante la información de sistemas de información</i>	Francisco Javier Lira Mendoza Daniel Jiménez Alcantar Moisés Ramón Villa Fajardo	260
<i>Procedimiento de dimensionamiento de un generador fotovoltaico aislado de baja potencia que opera bajo condiciones de sombreado parcial</i>	Michael Arenas Flórez Juan David Bastidas Rodríguez	269
<i>Metodología para pronosticar las demoras en las salidas de los vuelos regulares programados utilizando herramientas predictivas</i>	Juan Gerardo Muros Anguita Oscar Díaz Olariaga	283
<i>Pronóstico de la demanda de transporte de carga aérea. Caso de estudio Colombia</i>	Juan Gerardo Muros Anguita Oscar Díaz Olariaga	300
<i>Pronóstico de demanda de tráfico aéreo mediante metodología Bayesian Structural Time Series BSTS</i>		315

	Yesid Rodríguez Pinzón Oscar Díaz Olariaga	
<i>Generación de energía eléctrica a partir de cerámicos y fluoruro de polivinilideno PVDF</i>	Eliecer Yépez Sánchez Franklin Armando Bermeo Acosta	327
<i>Métodos de evaluación y medición de redes móviles emergentes: Aplicación NB-IoT para transportar datos de calidad del aire</i>	Samuel Alejandro Clavijo Hernández Mónica Rico-Martínez Yury Jiménez-Agudelo Luis Felipe Ariza Vesga José-Luis Cabra López	341
<i>Diseño de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diésel-baterías para zonas no interconectadas: Un estudio de caso</i>	Ana Lisbeth Galindo Noguera Mayra Alejandra Barrera Fajardo Rodolfo Solano Silva Luis Sebastián Mendoza Castellanos	355
<i>Evaluación de los estándares ASTM D877 y ASTM D1816 para determinar la tensión de ruptura dieléctrica a frecuencia industrial en aceites aislantes</i>	Fabio Alfonso González Michael Arenas Flórez Alonso de Jesús Retamoso Llamas Ángel Octavio Sandoval Pinzón Julián Andrés Caicedo López César Augusto Cristancho Franco	365
<i>Análisis de un sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersión</i>	Edwing Fabian Amaya Arias	376
<i>Desarrollo y evaluación de un sistema electrónico de adquisición de variables fisiológicas para el monitoreo de usuarios de un simulador con realidad virtual</i>	Juan Pablo Vasco Marín Santiago Caro Zapata Jonathan Gallego Londoño	384
<i>Diseño de un prototipo de balanza electrónica IoT para la medición de residuos orgánicos aprovechables en unidades residenciales</i>	Ángel Alejandro Rodríguez Aya Ramiro Hernán Polanco Contreras	404
<i>Diseño de electrodos flexibles y biocompatibles para recuperación de la función motora posterior a lesión medular</i>	Leydy Vanessa Rodríguez Robles Juan David Gómez Villa Efraín José Zapata Rey Beynor Antonio Páez Sierra Diana Maritza Marulanda Cardona Angélica María Ramírez Martínez	414
<i>Comparación de métodos de filtrado de interferencias de líneas eléctricas en la electromiografía superficial multicanal</i>	Carlos Arturo Carrasco Henao Eduardo Rodríguez Araque	423
<i>Sistema automatizado para la compensación de energía reactiva usando redes Neuronales</i>	Verena Mercado Polo Lizeth Cortes Hernández Miguel Antonio Peña Totaitive Jarvey Leonardo González Montañez	433
<i>Diseño y construcción de órtesis para alivio de cargas en la articulación de rodilla para ciclistas</i>	Duván Andrés Orjuela Santos Yolanda Torres Pérez	449
<i>Generación de un modelo predictivo de la fuerza de agarre para trabajadores del sector panelero</i>	Yulieth Tatiana Delgado Guzmán Jorge Yaith Arroyo Madera Magda Viviana Monroy Silva Christian Ricardo Zea Forero	460

<i>Aportes a la sostenibilidad social de proyectos de infraestructura urbana. Un caso de estudio comparado entre criterios de evaluación y actores de interés para infraestructuras en el sur de Chile</i>	María Jesús Osses Osses Leonardo Sierra Varela Felipe Araya	470
<i>Relación de criterios de contribución a la sostenibilidad social de aditivos asfálticos innovados y en uso</i>	Ricardo López Altamirano María Jesús Osses Osses Leonardo Sierra Varela	489
<i>Diseño de un dispositivo de utilidad para la verificación dimensional en soldaduras de filete y ranura</i>	Jorge Wilfredo Vera Alvarado Luis Fernando Caballero García	500
<i>Estudio de las prestaciones y pérdidas de fricción de un motor de combustión interna alternativo usando un sistema de relación de compresión variable</i>	Oscar Hernando Venegas Pereira Luisa Fernanda Mónico Muñoz Duván Caballero Casallas	509
<i>Capacidad de detección de defectos en juntas soldadas al variar la técnica de ensayo con partículas magnéticas</i>	Jorge Wilfredo Vera Alvarado Luis Fernando Caballero García Martín Taboada Neira	522
<i>Evaluación numérica de la estabilidad direccional de grieta bajo esfuerzos biaxiales</i>	Martín Iván Correa Corona Guillermo Urriolagoitia Sosa Francisco Javier Gallegos Funes	529
<i>ColombiaClass: Sistema de clasificación para la gestión de activos de construcción en Colombia</i>	Juan Carlos Gómez Roldán Guillermo Mejía Aguilar	543
<i>Análisis comparativo técnico y económico de la adición de asfaltita a una mezcla asfáltica densa en frío</i>	José Rodrigo Alarcón Dallos Wilmer Orlando Galvis Pinzón Pedro Antonio Suarez Rivera	560
<i>Efecto de los parámetros sobre el calor de entrada del proceso de soldadura por puntos de resistencia RSW en un acero ferrítico bainítico FB grado 700</i>	Noé Ibarra Interrial Rocío Saldaña Garcés Emmanuel José Gutiérrez Castañeda	574
<i>Descripción y recomendaciones para la durabilidad de la construcción indígena la maloca en la Amazonía colombiana</i>	Gabriel D. Zambrano-López Carlos A. Gaviria-Mendoza Ana Milena Molina Emilmar Sulamit Rodríguez-Caldera	586
<i>Estimación numérica de los parámetros de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica a baja temperatura</i>	Jesús Manuel German-Carcaño Beatriz Romero-Ángeles Jacobó Martínez-Reyes Daniel Maya-Anaya Arturo Sánchez-Cervantes Guillermo Urriolagoitia-Sosa	599
<i>Simulaciones Híbridas en Tiempo-Real SHTR aplicadas en la evaluación del desempeño dinámico de muros delgados de concreto reforzado afectados en una edificación aislada</i>	Bryan Castillo Torres Sharick Melisa Vides Quintero Andry Fernanda Hoyos Triviño Peter Thomson Johannio Marulanda Casas	610
<i>Análisis numérico de los gradientes térmicos por cargas de temperatura en tableros de puentes de concreto reforzado</i>	Camilo Andrés Ballesteros Avellaneda Edison Osorio Bustamante Erika Lorena Becerra Becerra	625

<i>Análisis dinámico no lineal de puentes de vigas cajón continuas mediante modelos simplificados de un solo grado de libertad</i>	Juan David Bravo José Miguel Benjumea Fabián A. Consuegra	635
<i>Diagnóstico al reflujo en un sistema de alcantarillado pluvial y sanitario</i>	Cesar Divantoque Martínez	650
<i>Evaluación de la vulnerabilidad física de la infraestructura rural por el desbordamiento de afluentes de agua</i>	Abdón Felipe Cely Negret Alejandro Franco Rojas	668
<i>Caracterización de las precipitaciones como primer detonante en la evaluación multi riesgo de los fenómenos de origen natural</i>	Yeison A. Mosquera Valencia Deison Cárdenas Espinal	682
<i>Evaluación de umbrales críticos de precipitación como principal detonante de la amenaza por procesos de remoción en masa</i>	María Alejandra Valencia Diaz Carlos Andrés Ordoñez Ante	693
<i>Proceso de soldadura por arco sumergido de biseles estrechos utilizando un electrodo de cinta metálica de sección rectangular</i>	Ronan Lázaro da Silva Costa Ariel Rodríguez Arias Eduardo José Sánchez Lobo	710
<i>Aprender programación de computadores a partir del reconocimiento de patrones lexicográficos y lógicos usando Brain Based Learning BBL</i>	Omar Iván Trejos Buriticá Luis Eduardo Muñoz Guerrero	720
<i>Modelo de arquitectura empresarial utilizando el lenguaje de modelado Archimate: Un estudio de caso</i>	José Daniel Peña Meneses	730
<i>RecordaMedic: Una aplicación móvil para la supervisión en la toma de medicamentos de los adultos mayores</i>	Jhon Freddy Hernández Corzo Alexandra María Silva Monsalve	739
<i>Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo de temperatura y humedad utilizando Internet de las Cosas IOT</i>	Bárbara Emma Sánchez Rinza Liosbel Cabrera Hernández Mario Rossainz López	751
<i>Machine Learning predictivo a partir de la analítica y de modelos de inteligencia artificial. Un caso de estudio</i>	Raúl Bareño Gutiérrez	759
<i>Impacto del método Attribute-Driven Design ADD 3.0 en la definición de arquitecturas de software</i>	Carlos Andrés Arboleda Suaza Jorge Eliecer Giraldo Plaza Adriana Xiomara Reyes Gamboa	768
<i>Diseño de una aplicación web para la atención de usuarios a partir de la metodología de desarrollo tecnológico</i>	Nancy Tavera Castillo Cesar Augusto López Cortés Ernesto Solano Hernández Jesús Guillermo Banquez Mendoza	779
<i>Impacto de la implementación de una plataforma como servicio para apoyar procesos de Formación empresarial mediante la modalidad MOOC</i>	José de los Santos Solórzano Suárez Sandra Milena García Córdoba Doris Constanza Alvarado Mariño Raúl Bareño Gutiérrez Jhonatan Paolo Tovar Soto	791
<i>Aplicación y uso de conceptos de matemáticos en procesos ingenieriles: Caso de estudio Ingeniería de sistemas</i>	Edwin Romero Cuero Robinson Pulgarín Giraldo	800
<i>Aplicación de Building Information Modeling BIM en el entorno educativo para el desarrollo de proyectos arquitectónicos</i>	Néstor Ariel Gómez Quisoboni Juan David Cortes León	811

<i>Utilización de métricas de calidad para evaluar las características de uso de un producto software</i>	Maribel Romero Mestre Edwin Manuel Vides Hernández	829
<i>Algoritmo para la interpretación dimensional de piezas automotrices con el uso de visión computacional y procesamiento de imágenes para el control de calidad</i>	Thania Godínez Gamiño Ylutiere Reyes Campos Cesar Augusto García Isais	840
<i>Mejoramiento del proceso de revisión tecnomecánica para motocicletas en un centro de diagnóstico automotor por medio de una simulación por eventos discretos en Promodel</i>	Luis Emiro Meneses Espinosa Duván Ernesto Meneses Espinosa Jaime Humberto Mendoza Chacón Nora Fernanda Arciniegas Sánchez	851
<i>Dinámica de sistemas y sus aplicaciones en logística urbana</i>	Claudia Milena Gómez Zuluaga Luis Alberto Rivera Martínez Andrés Rey Piedrahita	868
<i>Diseño de un sistema de conteo vehicular automático a través de visión por computador</i>	Fredy Nocua Mesa Daniel Albarracín Sepúlveda Diego Pita Pedraza	874
<i>Trastorno musculoesquelético derivado del uso de dispositivos móviles o síndrome de cuello de texto: Una revisión de la literatura</i>	Ricardo De la Hoz Lara Laura Imitola González Jhon Arráez Restan Jessica Cortez López Jhonatan Domínguez Perdomo Héctor Saltarín Castillo	883
<i>Desarrollo de un prototipo de realidad mixta como apoyo al proceso de aprendizaje de estudiantes con y sin discapacidad auditiva</i>	Yersson Sánchez Lozano Emmanuel Santiago Buitrago Barreto Martha Yaneth Segura Ruiz	891

Como citar los capítulos de este libro

Autor del capítulo. (2022). *Título del capítulo.* En Serna E. (ed.), *Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era* (pp. del capítulo xx-xx). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.

La Primera Revolución Industrial convirtió la producción manual en producción mecánica, para lo cual se utilizó la energía del agua y del vapor, y se convirtió en un punto de inflexión del desarrollo, tanto de la industria como de la ingeniería. Dada la producción económica del acero se desarrollaron los ferrocarriles, se introdujeron inventos revolucionarios derivados del uso de la energía eléctrica y de la producción en masa, y surgió la Segunda Revolución Industrial (Tecnológica). Posteriormente, la electrónica y las Tecnologías de la Información TI invadieron la industria, se aceleró la automatización y se incrementó el nivel de la producción. Fue entonces cuando la humanidad experimentó la Tercera Revolución Industrial, que dio lugar a cambios drásticos en las habilidades y destrezas en los puestos de trabajo.

En el siglo XXI el mundo ingresó a la Nueva Era, en parte por el surgimiento de la Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0), en la que la producción se basa en los sistemas ciberfísicos CPS y el Internet de las cosas IoT. Esto llevó a la humanidad a trabajar en un mundo cada vez más digitalizado, impulsado esencialmente por la automatización de los sistemas de producción. Los tiempos entre estas revoluciones han sido relativamente largos, pero dado el desarrollo actual de la ingeniería, se espera que en las próximas décadas se produzcan cambios masivos en los puestos de trabajo y, por consiguiente, en la formación y capacitación de los ingenieros.

Muchos visionarios se aventuran a predecir que se modernizarán los sistemas de producción con fábricas inteligentes, flexibles, autoorganizadas, dinámicas y optimizadoras, de modo que los procesos de toma de decisiones también se automaticen. La cuestión es que la Industria 4.0 depende esencialmente de las tecnologías digitales, que pueden ampliar la conectividad global y mejorar la utilización de los recursos. Por eso se espera que la ingeniería cambie radicalmente todos los aspectos de las sociedades, afectando al mismo tiempo las disciplinas científicas, las industrias y las economías en el Nuevo Orden Mundial.

Por su parte, las empresas deben actuar rápido y adaptarse a los cambios en la dinámica de sus sectores provocados por la Nueva Era, porque el objetivo es que sean sostenibles y alcancen ventajas competitivas. Como se expresa en varios de los capítulos en este libro, para esto necesitan adquirir o desarrollar conocimiento profundo, analizar su situación e implementar componentes como inteligencia artificial, realidad virtual, análisis de grandes datos, cadena de valor, computación en la nube, computación cognitiva, sistemas ciberfísicos CPS, interfaz hombre-máquina, integración de la información industrial, fábricas inteligentes, internet de las cosas IoT, entre otras tantas posibilidades que tienen a su alcance. Por lo tanto, y como lo demuestran los investigadores, el conocimiento y la experiencia sobre estos temas será una cuestión necesaria, tanto en la industria como en el mundo académico.

Algunos autores de capítulo en este texto se centran en analizar los niveles actuales de madurez de la transformación digital, una característica que cambia entre países e industrias; sin embargo, una vez que se logre la adaptación a la misma, la forma de vivir y de trabajar de las personas cambiará drásticamente en la Nueva Era. Es posible que muchos puestos de trabajo, que existieron hasta comienzos del siglo XXI, desaparezcan o que no necesiten personas, pero al mismo tiempo que aparezcan otros totalmente revolucionarios. Como algunos investigadores comentan se espera que la mayoría de los estudiantes que empiezan la escuela en esta década, trabajen en empleos que hoy no existen.

Prepararse profesionalmente para situaciones como esta significa no solo atraer y desarrollar nuevas habilidades, sino también recapacitar a los empleados actuales, buscando una mejor correspondencia entre las nuevas demandas de trabajo y las habilidades disponibles. Por otro lado, se espera que en las próximas décadas las profesiones deban adoptar y utilizar tecnologías que apenas hoy están en desarrollo, por lo que el sistema educativo los debe equipar con diversas habilidades y conocimientos técnicos para determinadas actividades o procesos, y que aprendan a aplicarlos en el Nuevo Orden Mundial. Como en ninguna otra disciplina esto es esencial en ingeniería, porque para que las personas sobrevivan en ese entorno dinámico, es inevitable un profundo cambio en la naturaleza de sus contenidos y modelos de enseñanza.

Por eso es que en este texto el lector podrá notar la afirmación de que la Nueva Era introdujo retos a los que la humanidad tendrá que hacer frente, que tendrán un profundo efecto en la ingeniería como disciplina.

El entorno en el que se desarrollan las funciones ingenieriles y las herramientas utilizadas para hacerlo cambiarán, lo que hará que el perfil de los ingenieros en cada área sufra una metamorfosis. La realidad es que estos profesionales, especializados en diversos campos técnicos y sociales que van desde la agricultura a la electrónica y desde la construcción a las obras públicas, transforman el conocimiento teórico producido por la ciencia en conocimiento práctico, por lo que tienen un rol protagónico en el desarrollo y la prosperidad de los países. En algunos capítulos se nota que, si bien tienen limitaciones económicas, los ingenieros se las ingenian para introducir nuevas tecnologías e invenciones para el desarrollo de la humanidad en la Nueva Era.

Otra cuestión tratada y analizada en este libro es la que relaciona con el futuro de los empleos y, para los investigadores, se espera que en pocas décadas la mano de obra desarrolle habilidades fundamentales en el nuevo entorno: pensamiento analítico, ingenio e innovación; aprendizaje activo; creatividad, originalidad e iniciativa; pensamiento crítico y análisis; resolución de problemas complejos; inteligencia emocional; y análisis y evaluación de sistema, entre otras. Como el lector podrá darse cuenta todas estas habilidades son cruciales para la práctica de la ingeniería hoy.

A medida que la automatización y la digitalización se extiendan, el papel que se espera de la ingeniería cambiará y el perfil de los ingenieros se revolucionará para responder a los requisitos de las habilidades para los trabajos de ingeniería en la Nueva Era. Por lo tanto, esto requerirá revolucionar los sistemas educativos, incorporando las nuevas tecnologías, los robots autónomos y adoptando métodos de enseñanza innovadores, que aprovechen el modelo de aprendizaje de la nueva categoría de estudiantes, sin olvidar que la actualización de los contenidos y de los planes de estudios también es necesario.

En este libro se describe cómo lograr una ingeniería para el desarrollo y la supervivencia de la humanidad en la Nueva Era, siguiendo caminos naturales o artificiales verdaderamente sostenibles. Los autores utilizan métodos desarrollados en varias áreas con fines de sostenibilidad, desarrollo y adaptación, tales como modelos matemáticos, selección de materiales y energía renovable; además, prueban los principios de la ingeniería en diversos trabajos prácticos y casos de estudio que el lector encontrará de fácil replicación y aprovechamiento en otras áreas, tanto ingenieriles como científicas.

Signo distintivo como estrategia de diferenciación: Análisis teórico a partir de un estudio de caso

Catherine Lopera Estrada¹

Juan David Henao Santa²

Iván Darío Rojas Arenas³

Institución Universitaria Pascual Bravo
Colombia

Se plantea un estudio de los posibles signos distintivos que se pueden asociar a una marca específica, que se construyen a partir de la aplicación de herramientas del diseño y un análisis teórico del concepto de signo distintivo y sus derivados. En esta medida, se plantea una metodología exploratoria, cualitativa y descriptiva dividida en tres etapas. De igual forma, se llevó a cabo una revisión de la literatura relativa al concepto de signo distintivo, la identidad corporativa, el *marketing* emocional y la psicología del color y su aplicación en el mercadeo. Los resultados dan muestra de la importancia del signo distintivo como una manera de diferenciar los productos y servicios, con base en la identidad corporativa de las organizaciones, generando un valor agregado que debe ser percibido por los consumidores. Se concluye que toda estrategia de gerencia de marca debe estar acompañada de un estudio riguroso de las características, tanto de la compañía como de los atributos de los productos o servicios a ofrecer, de manera que los signos distintivos desarrollados se alineen con los objetivos misionales y la realidad del contexto de mercado.

¹ Estudiante de Gestión del Diseño.

Contacto: catherine.lopera976@pascualbravo.edu.co

² Magíster en Gerencia de Empresas Sociales para la Innovación y el Desarrollo Local.

Contacto: j.henaosa@pascualbravo.edu.co

³ Magíster en Gestión de la Innovación Tecnológica.

Contacto: ivan.rojasar@pascualbravo.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los signos distintivos constituyen un factor diferenciador en las organizaciones, asociados a su identidad corporativa. Hoy en día, todas las empresas procuran identificarse a partir de los valores y atributos propios de sus productos o servicios, los cuales deben mostrar al mercado objetivo con el fin que el valor agregado sea percibido por este. En este sentido, en el presente proyecto se pretendió elaborar una serie de signos distintivos para la posible comercialización de productos de limpieza elaborados en el laboratorio de química de la Institución Universitaria Pascual Bravo IUPB, para posteriormente desarrollar una estrategia de gerencia de marca que permita un posicionamiento en el mercado.

Para tal efecto se procedió a desarrollar una estrategia metodológica exploratoria, cualitativa y descriptiva, en tres etapas. En la primera parte de este texto se muestra el apartado teórico, donde se abordan conceptos relacionados con el proceso investigativo y su objeto de estudio, tales como la definición de signo distintivo y sus tipos, la psicología del color, la identidad corporativa con sus distintos componentes, así como el concepto de marketing emocional.

También se explica detalladamente la estrategia metodológica empleada, que incluyó el uso de estrategias metodológicas, como el *Design Thinking*, el uso de una matriz de revisión de la literatura y la elaboración y aplicación de una encuesta. Se muestran los resultados obtenidos con base en los posibles colores, nombres y logos con los que se piensa generar la estrategia de marca para los productos derivados del laboratorio, de igual forma se hace un análisis de las respuestas obtenidas en cada pregunta.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Signo distintivo

Los signos distintivos son *distinciones* que utilizan los empresarios para identificarse en el comercio, para identificar su establecimiento o individualizar los productos que fabrica o los servicios que presta. Estos permiten singularizar o individualizar la actividad del empresario; en este sentido, son instrumentos que permiten establecer diferencias entre la competencia por un mercado específico, en la medida en que los clientes puedan identificar y valorar dichas diferencias [1].

En esta medida, el signo distintivo cumple una función comercial esencial, en un mercado donde existe una multiplicidad de productos, muchas veces de idénticas características técnicas y de calidad, o que pueden ser sustituidos con facilidad, haciendo que satisfacer y superar las expectativas de los clientes sea una tarea difícil, por tanto, solo las empresas que pueden hacer frente a este reto son capaces de fidelizar su clientela, de allí la importancia de entender el signo distintivo como un factor diferenciador [2].

Aportando a lo anterior, [3] entiende el signo distintivo como aquel elemento que permite la identificación y diferenciación de las prestaciones empresariales, en tanto que es una representación de la intencionalidad del empresario con su producto o servicio, es la impronta personal que hace que una organización pueda establecer un valor por su servicio o producto. Por otro lado, y en consonancia con el párrafo anterior, para [4, 5] un signo distintivo es un bien inmaterial que cumple precisamente una función identificadora frente a la competencia, razón en la que radica su importancia para una empresa.

Por su parte, [6] entiende los signos distintivos como parte de los derechos de propiedad industrial, como una forma de aplicación de la propiedad intelectual de las empresas, lo que presupone que agrega valor al producto, y dicho valor puede ser cuantificado como un activo contable e intangible.

2.1.1 Tipos de signos distintivos

Se reconoce la existencia de las siguientes clases de signos distintivos [1, 3, 4]:

- *Marca:* Es el vínculo entre la empresa y el cliente, por esto las empresas hacen grandes esfuerzos para crear y mantener una identidad de marca. Si la marca tiene una imagen favorable, todo nuevo producto

que se identifique con dicha marca contará con una ventaja competitiva que facilitará su comercialización. Para concebir una marca, se deben tener en cuenta algunos elementos básicos [4, 5]:

- La marca debe ser distinta de las marcas competidoras, no se pueden comercializar dos productos con la misma marca.
- Se recomienda solicitar una búsqueda de antecedentes en la oficina de propiedad industrial, para tener la certeza de que la marca está disponible antes de incurrir en inversiones de *packing*, publicidad, etc.
- El nombre de la marca debe ser sencillo y corto.
- La marca debe ser fácil de leer, deletrear y de pronunciar. La pronunciación se debe considerar si se aspira a la internacionalización.
- La marca debe ser fácil de recordar y reconocer.
- *Lema comercial*: Es un signo distintivo consistente, en una palabra, frase o leyenda que se utiliza como complemento de una marca. Es lo que se conoce comúnmente como eslogan, y es de anotar que muchas empresas apoyan su marca en lemas comerciales que trascienden, al punto de generar recordación en el público [7].
- *Nombres comerciales*: Signo o denominación que identifica a una empresa en el tráfico mercantil y que sirve para identificar, individualizar y distinguirla de las demás empresas que desarrollan actividades idénticas o similares [3].
- *Marcas colectivas*: Son pretendidas por asociaciones, corporaciones o colectividades, para identificar productos y servicios que tienen distinta procedencia empresarial pero que poseen características comunes, como su origen geográfico, material, modo de fabricación y son utilizadas bajo el control de un titular [8, 9].
- *Marcas de certificación*: Es aquella que identifica la calidad u otras características de un producto o servicio que han sido certificadas por aquella que identifica el titular de la marca [4, 5].
- *Denominaciones de origen*: Nombre de país, región o zona geográfica determinada utilizado para designar productos originarios de ese lugar y cuya calidad, reputación u otras características se deban al medio geográfico [10, 11].

2.2 Psicología del color

Al crear la identidad de una marca, los colores cuentan con un papel importante, pues estos son los que permiten atraer la atención de los posibles clientes. Los colores causan respuestas emocionales en los seres humanos, por esto no solo se debe tener en cuenta la combinación de estos sino también la psicología del color para el desarrollo de productos de mercadeo relacionados con una marca [12, 13].

Los colores y los sentimientos no se combinan de manera accidental, sus asociaciones no son solo cuestión de gusto, sino de experiencias universales profundamente enraizadas desde la infancia en el lenguaje y el pensamiento [14]. En este sentido, la psicología del color no solo es importante por el impacto que genera en las emociones y percepciones del ser humano, sino también por su posible impacto en las decisiones del consumidor. De esta manera, el color puede convertirse en un factor diferenciador en el momento de mostrar un producto, de allí que sea un tema trabajado en el área de marketing [14].

Cuando un consumidor genera la asociación de un color con las categorías de un producto en específico, es decir, asocia el color con la calidad, el sabor, el aroma, etc.; esto producirá finalmente una categorización de productos con unos respectivos colores, e incluso, como lo han demostrado diversos experimentos en el área de mercadeo, le dan una *personalidad* a dichos productos o marcas [15]. Así las cosas, el análisis del color y sus efectos en la percepción y el comportamiento del consumidor cobran relevancia, de allí que las

estrategias de gerencia de marca deban contemplar dentro de sus lineamientos la psicología del color como factor determinante de compra.

2.2.1 Características de los colores

Según como sean usados, los colores pueden transmitir emociones, de allí la importancia de conocer aspectos como [14]:

- *El tono:* Es el color en sí mismo, es la cualidad que define la mezcla de un color con el blanco o el negro, es decir, según su tonalidad un color puede ser rojo, verde, amarillo, etc.
- *La saturación:* Constituye la pureza del color respecto al gris, y depende de la cantidad de blanco que presente. Cuanto más saturado está un color, más puro es y menos mezcla de gris posee.
- *La brillantez:* Es la luminosidad de un color, es decir, que es la capacidad de reflejar el blanco se refiere a la claridad u oscuridad de un tono. La luminosidad puede variar añadiendo negro o blanco al color.

Al entender la importancia de la correcta utilización de los colores para la organización, nos damos cuenta de que la creación y uso de manuales o protocolos de imagen o identidad corporativa son más frecuentes, en estos se estipulan los colores exactos que se deben manejar tanto para la marca como para los diferentes productos que desarrolle la empresa.

Si las organizaciones en su marca tienen unos colores definidos y reconocidos en el mercado, los cambios o las fusiones que se realicen con otros colores deberán ser minuciosamente estudiadas, en caso de tener un posicionamiento de marca alto, la opción de cambio deberá reducirse al máximo ya que dichos cambios podrán distorsionar el concepto de los consumidores.

2.3 Identidad corporativa

La identidad corporativa se entiende como la manera en que una organización *comunica su marca*, esto es, la forma como despliega una estrategia comunicacional con el fin de dar a conocer la marca, sus atributos y bondades, los cuales se relacionan con la cultura organizacional [16, 17]. Es decir, la identidad corporativa constituye la esencia de la organización, su razón de ser, su modelo de negocio y el porqué de este, la forma como se relacionan con clientes y proveedores, la manera en que ofrecen sus productos o servicios, etc., es en sí la *personalidad de la empresa*, que la diferencia de las demás.

Para [18], identidad corporativa es todo aquello que hace que una empresa sea singular, lo cual implica que, si esta desaparece o cambia, también cambian los objetivos misionales de la organización, en tanto que afecta decididamente su ADN. Es preciso anotar, que este concepto no se debe simplificar como la mera existencia de una marca, un logo o un lema comercial, la identidad corporativa más allá de los signos distintivos de la organización, dado que esta refleja su intencionalidad, los valores y principios que la constituyen, su estrategia de competitividad es en sí, el reflejo de toda la empresa, el cual se presenta a partir de medios audiovisuales [16, 17].

2.4 Logo

Es importante tener claro que la verbalización del nombre de una marca se complementa con su visibilidad, por esto es necesario conocer la importancia de la creación de un logo, dentro de una empresa. Según [19], el logotipo es uno de los principales signos visuales de la identidad de una marca, el cual caracteriza a una organización. Los logos pueden estar compuestos por dibujos, iconos, palabras o ambos. Para el posicionamiento de marca es necesario tener un logo que transmita todo lo que es la empresa, por ende, debe ser correctamente creado, es aquí donde aparecen los diversos tipos de logo [17, 19]:

- *Los logotipos.* Son aquellos logos donde predomina la tipografía, es decir que no utiliza imágenes. Una de sus ventajas es que tiene facilidad de comprensión, pero cuenta con la desventaja que al ser simplemente una tipografía la capacidad de recordación de este tipo de logo es menor.

- *El Isotipo*: Este logo es aquel que utiliza solamente una imagen para transmitir el mensaje, puede tratarse de una abstracción geométrica o simplemente una figura, Es una insignia o escudo que habla por la marca.
- *El isologotipo*: Es una mezcla entre el isotipo y el logotipo. Estos logos combinan la parte gráfica y la tipografía.

2.5 Marketing emocional

El ser humano se mueve por emociones, de allí que se hable del comportamiento del consumidor como una forma de estudiar las razones por las cuales las personas deciden adquirir un determinado producto o servicio; la toma de decisiones tiene un alto factor emocional que las condiciona, lo cual implica que conocer dichas emociones le puede permitir a las empresas direccionar sus estrategias de mercadeo hacia la satisfacción de necesidades basadas en la emoción [20, 21].

El marketing emocional es la conexión de las emociones con la identidad de marca, buscando mejorar la experiencia de los consumidores con el fin de lograr su fidelización. Puede aplicarse a cualquier industria tanto en empresas grandes como pequeñas, las organizaciones que deseen desarrollar una estrategia de marketing emocional deberán diseñar el contenido y mensaje correcto, en el momento y lugar oportuno y escoger correctamente los clientes objetivo [22, 23].

A través del marketing emocional, se pueden entablar conexiones subliminales entre las organizaciones y su mercado objetivo, todo esto a partir de la generación de características propias del producto, que son reconocidas por el cliente y desarrollan en él un enlace profundo con la marca [22].

3. MÉTODO

En el proyecto se recurrió a una metodología de tipo exploratorio con enfoque cualitativo, dado que se llevaron a cabo encuestas con el fin de determinar el nombre de la marca, colores institucionales y logos a emplear en una posible estrategia de comercialización de productos elaborados en el laboratorio de química de la institución. De igual forma, es de tipo descriptiva y aplicada. El desarrollo del proyecto se dividió en tres etapas:

- *Etapa 1*: Revisión de la literatura, construcción de marco teórico, descripción del apartado metodológico. En esta etapa se emplea como herramienta para la sistematización de la información, una matriz de revisión sistemática de la literatura como la mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz revisión sistemática de la literatura

Pregunta de investigación	Criterios de inclusión	Bases de datos	Términos de búsqueda	Resultados búsqueda inicial	Evaluación resultados
¿Cómo desarrollar una marca institucional como estrategia para la venta de productos creados, derivados de un laboratorio académico?	Año de publicación, tipo de estudio, fuente, temática	Google Scholar, Dialnet, SSRN	Diseño gráfico, psicología del color, signo distintivo, logo	67 trabajos	24 trabajos seleccionados

- *Etapa 2*: Definición de posibles nombres, logos y colores, construcción y aplicación de encuesta para determinar los signos distintivos a emplear, análisis de la información obtenida. La encuesta en cuestión se aplica a estudiantes de la Facultad de Producción y Diseño de la IUPB, durante el semestre 2021-2, por medio de un formulario de Google. Para el desarrollo específico de los signos distintivos se usó la metodología del *Design Thinking* [24], en la cual se aplican 5 fases:

1. Empatizar: Se buscó conocer la percepción que tenía la comunidad de la IUPB, frente a una marca propia, en esta se propuso una encuesta para analizar el tipo de público encuestado y como se identificaban con ella, analizando formas, colores y palabras.
2. Definir: Después de recolectar la información en la encuesta que obtuvieron datos sobre la percepción de las personas, frente a una marca propia, se procedió a buscar referentes de diseño,

que estuvieran alineados con la identidad de la IUPB vs la percepción de las personas. En esta exploración se desarrolló un *moodboard* para recolectar e interpretar visualmente el concepto de marca.

3. Idear: Con el análisis del *moodboard* se proponen tipografías, formas, colores y texturas acordes a la percepción y referentes encontrados, se generan propuestas que evidencian el estudio y el análisis previo.
 4. Prototipar: Se realiza una selección de propuestas por parte del equipo de trabajo de un signo distintivo y posible aplicación en una etiqueta, se procede a imprimir y aplicar un producto específico; esta fase está pendiente.
 5. Testear: Con el producto desarrollado en los laboratorios, envasado y con su respectiva etiqueta se buscará realizar un grupo focal para recopilar información tanto de la marca, signo distintivo, aspecto visual, contenido del producto desarrollado, empaque y venta de este. Esta fase está pendiente.
- *Etapa 3:* despliegue de una estrategia completa de marca. Etapa pendiente.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La finalidad de la encuesta fue recopilar información para identificar el enfoque que debería tener la marca o signo distintivo, estuvo constituida por 5 preguntas asociadas a las características de una marca. En la pregunta uno se busca conocer a qué facultad pertenece cada uno de los encuestados, dando como resultado que el grupo de muestra fue en la Facultad de Producción y Diseño; en total participaron 47 personas. La composición por grupo etario de los encuestados se muestra a continuación:

- 16 y 20 años, con una participación de 12,8%
- 21 y 25 años, con una participación de 38,3%
- 26 y 30 años, con una participación de 21,3%
- 31 y 35 años, con una participación de 14,9%
- 36 y 40 años, con una participación de 4,3%
- 41 y 50 años, con una participación de 6,4%
- 50 y 70 años, con una participación de 2,1%

La primera pregunta relativa al posible nombre de la marca para los productos del laboratorio: *¿Qué nombre le llama más la atención?* con 6 opciones (Figura 1, Tabla 2).

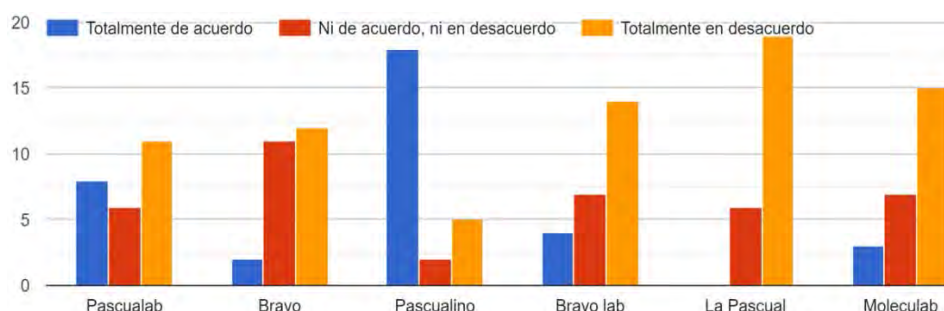


Figura 1. Posibles nombres para marca productos de laboratorio

Tabla 2. Análisis a las respuestas de la encuesta

Nombre	Totalmente de acuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	Totalmente en desacuerdo
Pascualab	8	6	11
Bravo	2	11	12
Pascualino	18	2	5
Bravolab	4	7	14
La Pascual	0	6	19
Moleculab	3	7	15

En la Tabla 2, se observa que 18 de 35 votos estuvieron totalmente de acuerdo con el nombre Pascualino, 11 de 39 votos estuvieron ni de acuerdo, ni en desacuerdo con el nombre bravo, 19 de 76 votos estuvieron totalmente en desacuerdo con el nombre La pascual.

Las preguntas 2 y 3 se relacionan con los tonos del manual de identidad de marca de la institución: *En una escala de 1 a 4, ¿con qué color identifica a la Institución?* divididos en dos tipos de colores: primarios y secundarios (Figuras 2 a 5).



Figura 2. Colores primarios manual de identidad de marca

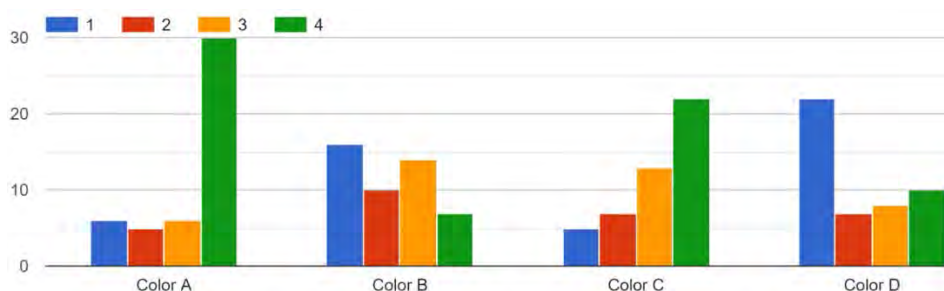


Figura 3. Análisis pregunta colores primarios manual de identidad de marca



Figura 4. Colores secundarios manual de identidad de marca.

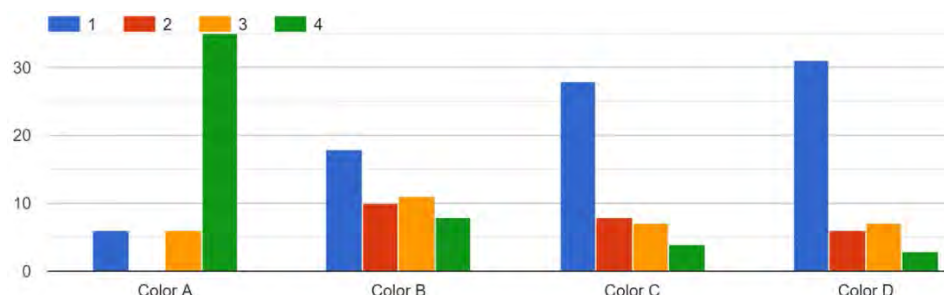


Figura 5. Análisis pregunta colores secundarios manual de identidad de marca

En las Tablas 3 y 4, se presentan los resultados obtenidos, relativos a la percepción de los colores primarios y secundarios, derivados del manual de identidad de marca y que serían usados en los signos distintivos propuestos.

Tabla 3. Análisis a las respuestas de la encuesta

Color primario	1	2	3	4
A	6	5	6	30
B	16	10	14	7
C	5	7	13	22
D	22	7	8	10

Tabla 4. Análisis a las respuestas de la encuesta

Color secundario	1	2	3	4
A	6	0	6	35
B	18	10	11	8
C	28	8	7	4
D	31	6	7	3

A partir de la información resumida en las Tablas 3 y 4, se observa que las personas se sienten más identificadas con los colores mostrados en las casillas A de cada tipo (primarios y secundarios).

A continuación, se indagó acerca del posible logo a emplear (*¿En una escala de muy bueno a muy malo, con qué icono identifica a la institución?*), tomando como referentes los mostrados en la Figura 6, que a su vez se construyeron con base en los símbolos empleados por los distintos programas académicos de la facultad. En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos.



Figura 6. Posibles logos grupo 1

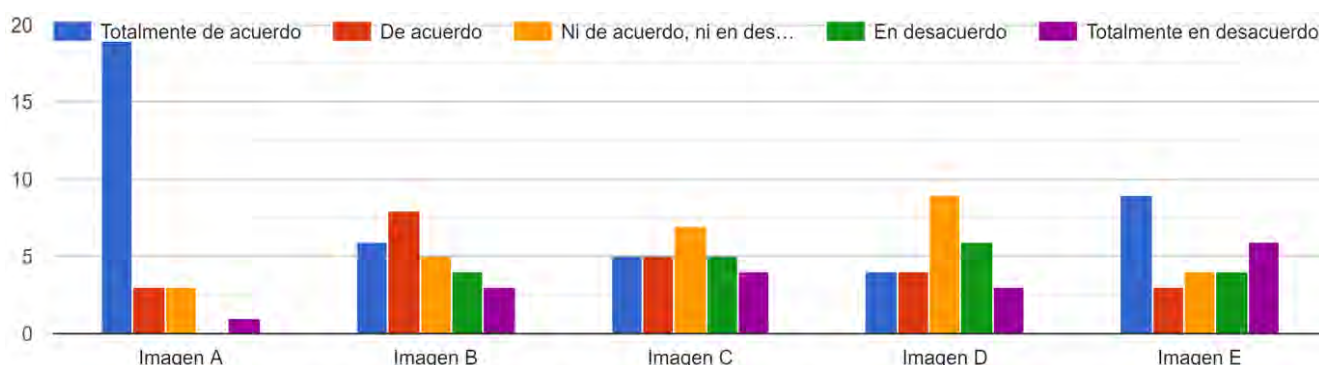


Figura 7. Análisis posibles logos grupo 1

De igual manera, se procedió con otro grupo de logos, empleando los mismos criterios (Figuras 8 y 9).



Figura 8. Posibles logos grupo 2

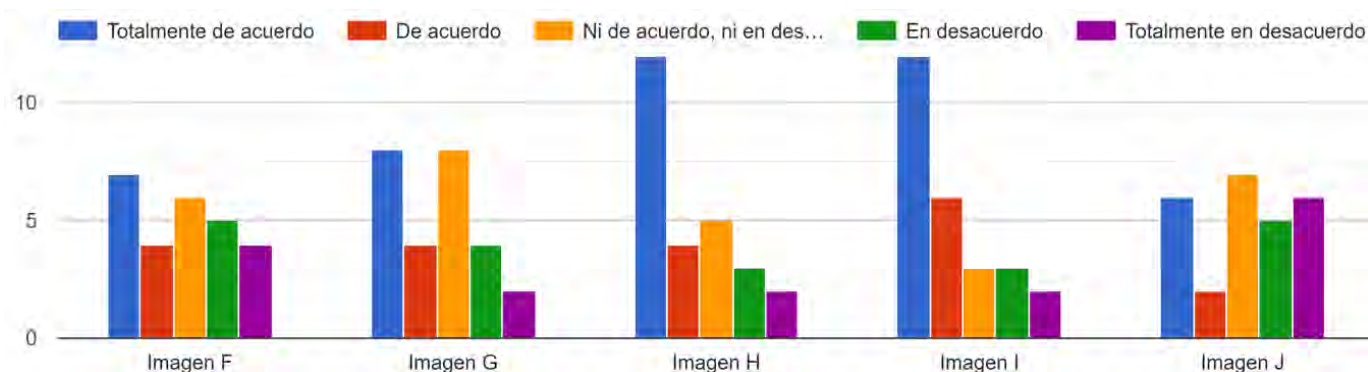


Figura 9. Análisis posibles logos grupo 2

En la Tabla 4 se resumen los resultados obtenidos frente a las preguntas anteriores. Se observa que 19 de 47 participantes se sintieron identificados totalmente de acuerdo con el icono A; 8 de 47 participantes estuvieron de acuerdo con el icono B; 9 de 47 participantes estuvieron ni de acuerdo, ni en desacuerdo con el icono D; 6 de 47 participantes estuvieron en desacuerdo con el icono D; 6 de 47 participantes estuvieron en total desacuerdo con los iconos E y J.

Tabla 4. Análisis posibles logos

Iconos	Totalmente de acuerdo	De acuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	En desacuerdo	Totalmente en desacuerdo
A	19	3	3	0	1
B	6	8	5	4	3
C	5	5	7	5	4
D	4	4	9	6	3
E	9	3	4	4	6
F	7	4	6	5	4
G	8	4	8	4	2
H	12	4	5	3	2
I	12	6	3	3	2
J	6	2	7	5	6

5. CONCLUSIONES

Los signos distintivos constituyen un factor diferenciador para las empresas; estos permiten establecer una conexión con sus clientes a partir de la identificación de las características del producto o servicio que generan valor agregado, y por tanto los diferencian de la competencia.

Cualquier producto o servicio que pretenda ser lanzado a un mercado específico, debe tener unas propiedades que lo identifiquen y le permitan al consumidor hacer su elección de compra con base en las mismas; el éxito de las compañías se centra así en la capacidad que tienen de mostrar los atributos de sus productos de forma efectiva.

Los estudios acerca de los signos distintivos son amplios y muestran como en esta área se han dado avances significativos, al punto que hoy en día las empresas tienen dentro de su estructura organizacional, áreas que se encargan de llevar a cabo una adecuada gerencia de la marca.

La generación de un signo distintivo debe ir de la mano con la identidad corporativa, de forma que este represente los ideales y objetivos misionales de la organización; así las cosas, en el presente estudio se pretendió llevar a cabo un proceso riguroso desde el punto de vista metodológico para desarrollar alternativas de signos distintivos viables y verdaderamente representativas de la identidad institucional de la IU Pascual Bravo, más específicamente de su laboratorio de química, en donde se están elaborando productos de limpieza para ser posteriormente comercializados. En esta medida, en la última etapa del proyecto se quiere presentar una propuesta coherente con el proceso investigativo, de forma que se ajuste a las necesidades y objetivos institucionales.

Para terminar, se espera que trabajos de este tipo sirvan como referente para futuras investigaciones relativas a su objeto de estudio.

REFERENCIAS

- [1] Grijalva J. (2017). Clasificación de los signos distintivos en la normativa andina de propiedad industrial. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- [2] Aragón F. (2012). La marca como signo distintivo ante el derecho y como estrategia institucional y empresarial en el sector turístico. la marca país. Recuperado: <https://cld.pt/dl/download/42cb39a2-9d80-4eae-8f59-a9e1713d1e70/Proceedings%20Book%20ITC%2713/Papers/P55-13.pdf>
- [3] Arana M. (2017). La protección jurídica de los signos distintivos: marcas, nombres y lemas comerciales. Fondo Editorial Universidad Católica del Perú.
- [4] Maravi A. (2014). Introducción al derecho de las marcas y otros signos distintivos en el Perú. Foro Jurídico 13, 1-11.
- [5] Serrano G. (2019). La marca o signo distintivo como derecho real y su oposición. Trabajo de grado de pregrado. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- [6] García I. (2017). Los signos distintivos: implicaciones de una marca colectiva. *Advocatus* 14(29), 107-123.
- [7] Aragaki et al. (2003). Estigmas. El misterio de la explotación de los signos distintivos. *IUS ET VERITAS* 26, 363-388.
- [8] Barrera et al. (2014). Riesgos y tensiones de las marcas colectivas y denominaciones de origen de las creaciones colectivas artesanales indígenas. *Apuntes*, 27(1), 36-51.

- [9] Cárdenas M. (2020). La gestión del conocimiento en la percepción del consumidor de una marca colectiva. *UTC Prospectivas* 3(1), 48-64.
- [10] De la Calle L. (2002). Denominaciones de origen y protección económica. *Estudios Agrosociales y pesqueros* 194, 27-48.
- [11] Barca E. (2007). Denominaciones de origen: La incidencia de la localización y la deslocalización. Recuperado: https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_DYC%2FDYC_2007_96_27_39.pdf
- [12] Martínez A. (1979). *Psicología del color*. Recuperado: <https://es.scribd.com/doc/261133222/A-Martinez-Canellas-Psicologia-Del-Color>
- [13] Moreno V. (2012). *Psicología del color y la forma*. Recuperado: <https://trabajosocialucen.files.wordpress.com/2012/05/psicologia-1.pdf>
- [14] Heller E. (2010). *Psicología del color. Cómo actúan los colores sobre los sentimientos y la razón*. Editorial GG.
- [15] Arboleda A. (2008). Percepciones del color y de la forma de los empaques: una experiencia de aprendizaje. *Estudios Gerenciales* 24(106), 31-45.
- [16] Cucchiari C. (2019). *Identidad Corporativa: Planificación estratégica generadora*. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Cuyo.
- [17] Carrero Y. (2019). Identidad corporativa y los valores organizacionales, desde un liderazgo de avanzada. *Revista Scientific* 4(14), 347-366.
- [18] Pizzolante I. (2004). *El poder de la comunicación estratégica*. Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- [19] Costa J. (2003). La gestión de la comunicación y la nueva figura del director de la comunicación. Recuperado: http://www.onenet.com.ar/fidec/pagina_nueva7.htm
- [20] Ortega V. (2017). Gestión de la imagen corporativa de organizaciones universitarias desde el enfoque del marketing emocional. *CienciaMatria* 3(5), 150-170.
- [21] Küster et al. (2008). El marketing relacional y el marketing emocional: dos enfoques competitivos para el turismo de sol y playa. *Estudios sobre consumo* 84, 31-40.
- [22] Barragán et al (2017). La economía de la experiencia y el marketing emocional: estrategias contemporáneas de comercialización. *International Journal of Good Conscience* 12(2), 159-170.
- [23] Cadavid H. (2004). Marketing de emociones. La forma para lograr fidelidad de los clientes. *Semestre Económico* 7(13), 203-211.
- [24] Madrigal G. et al. (2018) *Manual de Design Thinking*. Universidad Tecnológica Santa Catarina.

Caracterización del sector de transporte de pasajeros intermunicipal en el departamento de Santander, Colombia

Luz Helena Mendoza Castro¹

Sandra Milena Sandoval Marín²

¹ *Unidades Tecnológicas de Santander*

² *Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo*
Colombia

El transporte intermunicipal de pasajeros legalmente constituido de Bucaramanga, Colombia, presenta complicaciones económicas y financieras. Por un lado, porque los usuarios de escasos recursos optan por utilizar el transporte no formal y, por otro lado, porque las aerolíneas con nuevas rutas ofrecen recorridos cortos, mayor cobertura, más comodidad y seguridad. En este capítulo se presenta la caracterización de este sector económico desde el punto de vista de aspectos generales, de recurso humano, contable-financiero y servicios ofertados. La muestra corresponde a 12 empresas constituidas legalmente, y los resultados indican que la mayoría de las empresas son sociedades limitadas y otras son sociedades anónimas. Una vez aplicado el instrumento de medición tipo encuesta, se determinó que los vehículos de transporte intermunicipal constituyen un modelo de negocio tipo afiliación, donde las personas se vinculan con sus vehículos a una empresa de manera legal, articulada y organizada para prestar sus servicios, siendo un negocio rentable para los propietarios. Además, el transporte informal e ilegal han disminuido el flujo de caja de las empresas legalmente constituidas, porque acarrear con costos derivados de mantener la nómina, gastos administrativos y otros gastos operacionales, poniendo sus servicios en desventaja en cuanto a los precios de tiquetes e incluso con los tiempos de respuesta al prestar el servicio.

¹ Contadora Pública y Magíster en Finanzas.

Contacto: lmendoza@correo.uts.edu.co

² Administradora Financiera y Especialista en Gestión de Empresas.

Contacto: sandra.sandoval@unicienciabga.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El transporte intermunicipal de pasajeros del departamento de Santander con el paso de los años se ha convertido en parte fundamental de la economía, por ende, se hizo necesario determinar cómo están afectadas financieramente las empresas del gremio con el fin de brindarles información útil en materia de optimización de recursos, productividad, inversión y competitividad.

Es de vital importancia que el servicio privado de transporte se entienda como aquel que satisface las necesidades de movilización y dar cumplimiento a la normatividad establecida por el Ministerio de Transporte.

La sala plena de la corte constitucional define el transporte como la movilización de personas o cosas por lo cual recibe una contraprestación en su mayoría dinero, además busca satisfacer el nivel de oferta de acuerdo a las necesidades de la comunidad buscando el cumplimiento de la normatividad y prestando el servicio con las mejores condiciones de seguridad.

Lo anterior permitió mediante la caracterización detallada del sector transporte intermunicipal conocer la situación actual en los ámbitos laboral, financiero, empresarial y de competencia con el objetivo de planificar estrategias óptimas para fortalecer las empresas, mejorar la eficiencia y eficacia y comprender así mismo la expansión de tecnologías aplicables al sector.

Esta investigación evidenció la incidencia de factores como la proliferación del transporte informal en la prestación del servicio de transporte de pasajeros, el descontento de las empresas con el pago de impuestos, incremento del uso indiscriminado de medios de transporte privado, y así mismo se observó de cerca el abuso y mal manejo de nuevas tecnologías que han aumentado la crisis económica de estas empresas, entendiendo que los problemas financieros son en gran medida derivados directamente por la pérdida de los pasajeros.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Las terminales de transporte en el país y en Bucaramanga

A nivel nacional, el país cuenta con 42 terminales de transporte constituidas legalmente y habilitadas para funcionar con autorización del Ministerio de Transporte; sin embargo, esto refleja que solo el 3,74% de los municipios en Colombia tienen terminales de transporte adscritos a dicho ministerio [1].

En la actualidad, existen 260 empresas de transporte legalmente constituidas en Santander para prestar el servicio de transporte de pasajeros de las cuales solo 22 son de transporte intermunicipal; estas empresas prestan sus servicios en la Terminal de Transporte de Bucaramanga el cual es considerado como uno de los mejores Terminales de Transporte Terrestre del país, se caracteriza por ser de los más modernos y seguros y funciona desde el año 1991 como una empresa constituida como sociedad anónima de economía mixta que promueve la comodidad y seguridad a los usuarios contribuyendo al ordenamiento urbano.

La superintendencia de puertos y transporte de Colombia indica que un programa de infraestructura en las terminales debe cumplir con indicadores de puntos de información, sanidad, señalización, casetas de control, patios operativos, plataformas, acceso al terminal, control ambiental, servicios sanitarios, circulación peatonal, acceso vehicular e inclusión [2]. Para 2017 el Diagnóstico de infraestructura de las Terminales de Transporte Terrestre Automotor de Pasajeros por Carretera identificó que la Terminal de Transportes de Bucaramanga tiene una ponderación de infraestructura del 74% [3], donde se analizaron variables que se muestran a continuación en la Figura 1.

A nivel nacional, las terminales se clasifican según la ubicación en regionales, departamentales o municipales y según su función se clasifican en: 1) *central*, donde existe un punto inicial y final de los recorridos; 2) *de paso*, donde se establece un punto para recoger pasajeros; 3) *local*, donde se establecen líneas para prestar el servicio a una zona determinada y los recorridos son cortos; y 4) *servicio directo*, donde el pasajero aborda un vehículo en la terminal y este no hace paradas hasta llegar a su destino [4].

INDICADOR	ITEM GUIA (FRI)	EVALUACIÓN
Puntos de Información	Punto de información	Bueno
Sanidad	Área Enfermería	Bueno
	Área Alcoholimetría	Bueno
	Sala de Conductores	Bueno
Señalización	Informativa	Bueno
	Preventiva y de Emergencias	Bueno
Casetas de Control Terminal	Caseta de control de entrada de vehículos	Excelente
	Caseta de control de salida de vehículos	Excelente
Pacios	Vías Ingreso de Patio Operativo	Excelente
	Vías Salida de Patio Operativo	Excelente
	Patio Operativo	Regular
Plataformas	Plataforma de Abordaje	Bueno
	Plataforma de descenso	Regular
Acceso Terminal	Zonas de ascenso y Descenso de Usuarios de taxis	Regular
	Zonas de ascenso y Descenso de buses	Regular
Control Ambiental	Hay contaminación del agua en el terminal	No
	Hay contaminación del aire en el terminal	No
Servicios	Área recolección de basuras	Bueno
	Baños de servicio público	Bueno
Acceso Peatonal	Corredores peatonales	Bueno
	Rampas, ascensores, escaleras	Bueno
Acceso vehicular	Mobiliario y salas de espera	Bueno
	Vías de acceso al terminal	Bueno
Accesibilidad e Inclusión	Zona de parqueaderos para vehículos particulares	Regular
	Parqueaderos Accesibles	Parcialmente
	Espacio Público accesible	No cumple
	Rampas y Vados peatonales accesibles	Parcialmente
	Servicio de Guía y Asisten.	No cumple
	Taquillas accesibles	No cumple
Tipo de sociedad	Señalización	Cumple
	Baños Accesibles	Parcialmente
	TIPO DE SOCIEDAD	MIXTA

Figura 1. Diagnóstico Infraestructura Terminal de Transporte de Bucaramanga [3]

Las terminales de transporte terrestre automotor de pasajeros por carretera se componen de instalaciones físicas que ofrecen servicios permanentes, junto a personal administrativo, servicios a los usuarios, a las empresas de transporte y a su parque automotor, allí se reúnen las empresas autorizadas que desarrollan su actividad transitando a su respectivo municipio con un origen y un destino.

El servicio público de transporte terrestre de pasajeros es el que se presta bajo la competencia de una empresa que cumple con los lineamientos legales y que además está habilitada en esta modalidad, a través de un convenio entre la empresa y cada una de las personas que utilizan el vehículo de servicio público, para recorrer las rutas autorizadas. Una de las principales preocupaciones de las empresas legalmente constituidas es el aumento del transporte informal, y aunque ha sido un tema muy mencionado las autoridades han buscado acabar con este, brindando oportunidad a esas personas que prestan estos servicios para que se legalicen, pero al momento sigue siendo una problemática que preocupa a las empresas pues este servicio ha afectado sus ingresos.

El transporte informal nace asociado al concepto de irregularidades en cumplimiento de las normas, este carácter de ilegalidad se asocia a la falta de sanciones por parte de las autoridades competentes, de igual forma a la ausencia de vinculación laboral y al desvío de porcentajes de lo producido.

2.2 Evolución del sistema de transporte en Colombia

La rueda surgió en la edad de bronce (2.700 años antes de la era común) no obstante, durante el renacimiento el principal medio de transporte era las carabelas permitiendo entre otros las colonizaciones a partir del siglo XVI. Con el intercambio comercial las comunidades prehispánicas buscaron formas de movilidad dando inicio al transporte, aun así, el mal estado de los caminos de herradura dificultó el traslado de los animales dificultando el avance de los medios de comunicación [5]. En Colombia, para 1828 se construyó el primer ferrocarril llamado ferrocarril de Panamá; con el paso del tiempo y a partir de la crisis de 1929 se decide incentivar el transporte carretero urbano facilitando el traslado del café y se abren vías rurales para el uso del Jeep, el Willys y la chiva [6].

Cabe recordar que el transporte terrestre es el que se realiza sobre la superficie terrestre, gran parte sobre ruedas, como el caso de los automóviles, autobuses, motocicletas, etc. A continuación, en la Tabla 1 se resume la evolución del transporte en Colombia.

Tabla 1. Evolución del transporte en Colombia

Año	Acontecimiento
1805	Se utilizan las silleas colgadas para transportar persona o enfermos, además del uso de cargueros.
1818	Se utiliza la bicicleta como vehículo para transporte humano, con el paso del tiempo surgió la motocicleta.
1819	Se domesticaron animales para el transporte de carga y de personas, especialmente en caballos y carruajes.
1855	Se construyó el ferrocarril de Barranquilla y llegó la primera locomotora que bautizaron Bolívar.
1882	Se crea el automóvil, gracias al descubrimiento del petróleo, el primer vehículo llegó de Francia a Antioquia.
1908	Se utiliza el bus escalera, conocido como chiva, que dio paso a lo que hoy se conoce como autobús.
1914	Se utiliza la motocicleta, siendo popular en la juventud, fabricada de dos ruedas y con función de motor.
1980	Se construye el sistema metro en Medellín, hasta el momento la única ciudad del país que tiene este servicio.
2017	Se da a conocer los vehículos Sedán, que brindan mayor comodidad al transporte familiar y con espacio para bodega.

Esta evolución ha beneficiado a los demás sectores económicos del país trayendo consigo altos niveles de progreso, competitividad y servicio y siendo esencial para la mejora de la movilidad de personas y carga frente a las expectativas de los usuarios generando mejor calidad de vida.

Sin duda la crisis económica por el Covid-19 y la baja de precios del petróleo a nivel internacional incrementa el déficit económico colombiano aumentando consigo las cifras de pobreza y desempleo. Frente a esto la infraestructura vial ha crecido de manera considerable en los últimos años dados los proyectos de vías de comunicación de cuarta generación que surgieron entre 2014 y 2016 lo que es positivo para la generación de empleo y el ingreso en los hogares [7].

Así mismo, el crecimiento de la infraestructura reduce la pobreza y la desigualdad de la sociedad, en contraste, la falta de vías o la baja calidad de las mismas se materializan en desigualdad económica [8] dificultando el acceso a mercados y aumentando los costos de desplazamiento.

Es pertinente mencionar que el transporte es un sector fundamental para el crecimiento económico de una nación, a través del oportuno aumento de sus diferentes modos, es probable asegurar un efectivo tránsito de las mercancías, incrementando así la competitividad. De igual manera, es esencial para el progreso social ya que el contar con una movilidad apropiada que satisfaga las exigencias de los ciudadanos, es importante para la generación de tranquilidad, calidad de vida e igualdad.

En contraste se puede decir que en Colombia las características geo ambientales en muchas regiones hacen que sea difícil el acceso para desarrollar obras y por ende el gobierno no ha logrado establecer carreteras terciarias que conecten las regiones. Además, el deterioro de las vías produce un impacto económico muy alto que se refleja en el incremento de los costos de operación vehicular para los usuarios por concepto de mayor consumo de combustibles, neumáticos, repuestos, desgaste del vehículo, duración de los tiempos de viaje y por accidentes de tránsito.

2.3 El transporte terrestre

El transporte terrestre es el ejercido sobre la superficie de la tierra y es utilizado para la movilidad de personas y mercancías. La entrada del ferrocarril posibilitó el incremento del transporte de carga y fue considerado el transporte revolucionario, con el tiempo este fue evolucionando y perfeccionándose.

Para el siglo XIX el hombre buscó nuevas maneras de transportarse por carretera de manera rápida y cómoda y que no hiciera uso de los animales, fue así como surgió los vehículos con aplicación de petróleo y acero, ejemplo de esto fue la creación de Henry Ford a principios del siglo XX con su producción en serie del vehículo Ford T [9]. Los primeros vehículos de este siglo eran de uso familiar y privado y su velocidad máxima era de 25 kilómetros por hora, así mismo las vías fueron construidas en base a los caminos existentes; hoy día el transporte lo componen autos, autobuses, camiones y demás y se cuenta con importantes carreteras y de gran capacidad que permiten el tránsito a mayor velocidad y con más capacidad de carga y de personas y el servicio es vigilado por la Superintendencia de Puertos y Transporte.

Lo anterior deduce que el transporte terrestre es cada vez más eficiente en el transporte de personas, mercancías y bienes, aun así es significativo el avance en los países desarrollados por la variedad y cantidad

de medios de transporte que ofrecen sus servicios frente a lo ofertado por los países menos desarrollados, esto es porque los grandes países tienen mejor y mayor cobertura de vías, tecnología e inversión y los países en desarrollo existe todavía áreas sin vías de comunicación y con poca tecnología.

Estos medios de transporte pueden ser públicos o privados, el primero es solventado y controlado por el Estado y el segundo corresponde a empresas particulares cuya responsabilidad recae directamente sobre los dueños [10]. Lo cierto es que el transporte satisface necesidades del sector terciario, así como los aspectos socio-culturales y el desarrollo económico, además, mejora los sectores adicionales como la salud y la equidad social en un contexto de transporte sostenible [11].

Existen dos tipos de transporte terrestre, el transporte por carretera es aquel que utiliza ruedas y por lo general por vías pavimentadas o carreteras, entre ellos se encuentran los vehículos, los autobuses, las motocicletas y las bicicletas entre otras; el transporte por rieles es el que transita por vías predeterminadas como es el caso de los trenes, los tranvías y los subterráneos que cuentan con estaciones y paradas durante el recorrido.

De otro lado el servicio de transporte terrestre intermunicipal, tiene una demanda que varía entre los días de la semana, entre semanas del mes y entre meses del año [12], es por esto que los días festivos, las vacaciones escolares y la semana santa entre otros hacen que fluctúe el dinamismo del servicio, lo que a su vez incrementa o disminuye los ingresos de las empresas prestadoras de servicios.

2.4 Aporte del transporte a la economía

El poseer buena infraestructura de transporte es un factor de acceso a las actividades económicas y de prestación de servicios, el tener medios de transporte efectivos que incluyan buena calidad de vías y caminos permiten que el transporte de personas y mercancías se de en forma segura y el tiempo requerido. Lo anterior refleja que el desarrollo económico de cualquier país está inmerso entre otros por contar con medios de transporte que brinden buenas condiciones comerciales ya que a diario gran cantidad de vehículos permiten el tránsito de personas y mercancías de los cuales depende la economía.

El desarrollo económico es el resultado del mejoramiento de la producción de bienes y servicios, dentro de esto la infraestructura terrestre las carreteras y los caminos impulsan la movilidad a fin de satisfacer las necesidades de transporte de las personas y del comercio en general [13], lo que, en Colombia, por ejemplo, conlleva a la modernización y al incremento económico.

Para la economía en Colombia el sector transporte permite la vinculación de sus departamentos más distanciados, por lo que continuamente se busca prestar servicios de calidad, mejorando la eficiencia en tiempos y precios, en la medida que el desarrollo de las regiones crece las exigencias del sector transporte aumentan llevando a las empresas a implementar la competitividad como medio de crecimiento. El aporte que genera el transporte en la población santandereana enmarca el bienestar individual coadyuvando al crecimiento colectivo, llevando consigo el desarrollo social, permitiéndole a la población el acceso a la educación, cultura, salud y recreación y a su vez generando empleos dignos.

El principal medio de transporte para comunicar la región santandereana es terrestre y debe guardar consigo características de desarrollo económico e innovación en el que participan las principales empresas vinculadas y que además su crecimiento financiero se fundamenta en gran medida a los planes de desarrollo en infraestructura vial tanto del Estado como del departamento.

En los últimos años, el crecimiento de la comercialización de automóviles y las facilidades de pago han derivado en la utilización de estos como medio de transporte informal o pirata, estos problemas han aumentado en 30%, restando oportunidades a los transportadores legales y la merma de los usuarios, quienes reciben un servicio con poca o ninguna garantía.

Las empresas de transporte deben fortalecer su desarrollo financiero teniendo como base el análisis idóneo de cifras, presupuestos, auditoria de recursos, e indagar la manera de aprovechar los beneficios tributarios

vigentes con el objetivo de buscar un crecimiento y expansión y enfrentar de manera acertada la disminución de ingresos gracias a la mayor oferta del servicio tanto legal como ilegal.

De otro lado, el transporte terrestre asegura la movilidad de pasajeros en un 88% más que lo realizado por el transporte aéreo, sin embargo, el sector afronta desafíos debido a la baja en tarifas de tiquetes aéreos y la entrada de nuevas aerolíneas al país, lo que representa competencia al sistema de transporte por carretera.

2.5 Responsabilidades en materia de pago al Estado colombiano

El sistema de transporte en Colombia tiene la responsabilidad de aportar constantemente al país, y esto se puede establecer gracias a los cargos como usuarios proveedores de transporte, entre los cargos están; Impuesto a la gasolina, Impuesto compra de vehículo, sobretasa a la gasolina, impuesto de rodamiento y peajes que se definen de la siguiente manera:

- *Impuesto a la Gasolina.* El Impuesto a la gasolina y al ACPM fue reglamentado por el artículo 167 de la Ley 1607 de 2012. En la misma Ley se sentó que el día primero de febrero de cada año se debía reajustar el valor de este impuesto de acuerdo con la inflación.
- *Impuesto a la compra del vehículo.* Una de las prioridades del gobierno colombiano es la promoción de tecnologías vehiculares limpias, razón por la cual expidió decretos para la reducción de arancel de este tipo de vehículos dados sus altos costos. El último decreto que entrega este beneficio es el Decreto 2909 de 2013 que otorgaba la reducción de arancel al 0% para vehículos eléctricos y de 5% para vehículos híbridos con sus respectivos sistemas de carga. No obstante, estos vehículos aún tienen un alto costo frente a los vehículos tradicionales (diésel y gasolina). Adicionalmente existen otros beneficios que permiten la reducción de impuestos como IVA y renta que es usado principalmente por grandes empresas como Transmilenio, pero no por particulares debido al trámite para acceder a dicha reducción.
- *Impuesto al rodamiento.* El capítulo VI de la Ley 488 de 1998 establece el impuesto sobre vehículos automotores como impuesto territorial. La administración y control del impuesto es de competencia del departamento o distrito. El ochenta por ciento corresponde a los departamentos mientras que el veinte por ciento corresponde a los municipios a que corresponda la dirección informada en la declaración. La tarifa se determina según valor comercial del vehículo basada en las tablas de avalúo establecidas por resolución (anual) del Ministerio de Transporte.
- *Peajes.* corresponde a la tasa o tarifa cobrada a un medio de transporte por el derecho de transitar una vía de comunicación, estas tasas son diferenciales en proporción a la distancia de recorrido y las características de los vehículos. Todos los aportes que realizan las empresas transportadoras se traducen finalmente en una reinversión para el desarrollo en la infraestructura vial, que a su vez les permite circular y ejecutar el servicio de transporte de personas por todo el corredor nacional, formando todo esto una parte del costo de operación de las empresas.
- *Peajes en el departamento de Santander.* En el departamento existen 12 peajes de los cuales siete son administrados por Invías y los restantes son responsabilidad de la Agencia Nacional de Infraestructura ANI, administrados por las Concesiones Ruta del Cacao y Autovía Bucaramanga-Pamplona, y los peajes a cargo del Instituto Financiero para el Desarrollo de Santander IDESAN.

3. MÉTODO

Esta investigación se llevó a cabo utilizando una metodología descriptiva con enfoque cualitativo; para caracterizar las empresas de transporte intermunicipal de pasajeros del municipio de Bucaramanga se realizó primero una consulta ante la Cámara de Comercio de Bucaramanga con el fin de conocer la cantidad de empresas de transporte existentes, con esta información se hizo una tabulación con el objetivo de validar cuáles están ubicadas dentro del terminal de transporte y cumplen con los requerimientos legales de funcionamiento.

La investigación fue deductiva ya que inicio con el planteamiento del problema, la observación de varias fuentes e información de empresas que permitió agrupar y analizar semejanzas; lo que conllevó a la inducción para caracterizar las empresas y formular conclusiones de manera general. Con la información recolectada en las encuestas se realizó un análisis con ayuda de hojas de cálculo, gráficos y tablas, finalmente se presenta un informe en el cual se describe los factores de mayor incidencia que influyen en el desarrollo económico de las empresas objeto de estudio.

Se usaron fuentes primarias compuestas por las encuestas aplicadas a las empresas y fuentes secundarias como libros, tesis y artículos de donde se recopiló la información similar necesaria. A la fecha de estudio de esta investigación, la plataforma Compite 360 de la Cámara de Comercio de Bucaramanga reportaba 22 empresas de transporte intermunicipal siendo la población objetivo y cuya muestra de población finita con un 90% de confianza y un 5% de margen de error, indica que la muestra es de 20 empresas a estudiar.

Finalmente, el estudio solo fue posible con 12 empresas debido a factores externos como protocolos de Bioseguridad que no permitieron la entrada a las empresas en época de pandemia. Cabe resaltar que varias de las empresas no pertenecen realmente a Bucaramanga, sino que sus sedes principales son en otras ciudades y por ende inscritas en la cámara de comercio de estas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Variables estudiadas

4.1.1 Aspectos Generales

La constitución legal de las empresas tanto de personas naturales como jurídicas sirve como respaldo jurídico y permite prestar los servicios de transportes cumpliendo con la normatividad vigente. En cuanto a la constitución legal se evidenció que el 92% tiene personería jurídica, mientras el 8% opera como persona natural, esto refleja que las empresas de transporte intermunicipal de pasajeros se han constituido legalmente como sociedades en un porcentaje bastante alto.

De las empresas constituidas con personería jurídica, el 67% corresponde a sociedades limitadas, mientras el 33% está constituido como sociedades anónimas. Esto permite deducir que la preferencia en la personería jurídica radica en la facilidad en cuanto a préstamos y créditos, confiabilidad con sus clientes, mayor competitividad, ampliación de sus mercados y mayor rapidez en cuanto a posicionamiento.

En cuanto a la trayectoria en el mercado es un factor que influye en la manera que las personas perciben la calidad de los servicios y el valor que pagan las empresas por la prestación de este favoreciendo la productividad.

En lo referente al tiempo que llevan las empresas en el mercado, se constató que poseen gran experiencia en el negocio transportador haciéndolas sólidas a pesar de las dificultades, en la siguiente gráfica se puede observar que un 92% de las empresas encuestadas poseen más de 30 años al servicio de sus pasajeros; en la Figura 2 se muestra estos resultados.

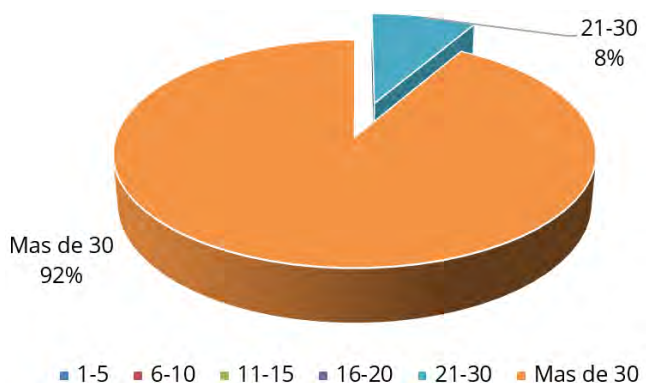


Figura 2. Tiempo en años de las empresas en el mercado

4.1.2 Aspectos de Recurso Humano

El proceso de reclutamiento de personal va de la mano con la capacidad del desarrollo humano y la forma como se estimula, lo que se convierte con el tiempo en resultados y alta productividad en las organizaciones. La función más importante del departamento de talento humano es realizar la organización y gestión de las habilidades del personal de tal manera que se cumplan con los objetivos trazados, verificando las necesidades que tiene cada empresa. La Figura 3 muestra la cantidad de empleados que tienen contratado las empresas de este sector.



Se observó que las empresas de transporte intermunicipal de pasajeros de la ciudad de Bucaramanga tienen vinculados en su empresa gran cantidad de empleados. Según la Figura 3, el 33 % de las mismas tienen vinculado más de 200 empleados al igual que en el rango de 11 a 50 personas, seguido en un 25% del total de las empresas que tienen entre 51 y 200 empleados y en menor porcentaje con el 8% cuentan solamente con 1 a 10 personas laborando. Se puede decir, que este es un sector que aporta en gran medida a la disminución del desempleo en el área metropolitana de Bucaramanga y del departamento de Santander.

Otro aspecto es la compensación salarial que se convierte en el pago que reciben los empleados por cumplir con sus responsabilidades y labores asignadas, y a su vez le ayuda a satisfacer sus necesidades materiales, a las empresas le permite mantener su personal con las condiciones adecuadas brindando estabilidad y motivando a la permanencia en los cargos. En relación con la población objeto de estudio se verificó que tanto conductores como personal administrativo y comercial devengan entre 1 y 3 salarios mínimos mensuales legales vigentes por el cumplimiento de sus labores.

4.1.3 Aspectos contable-financieros

En cuanto a los estados financieros que son la imagen de la situación financiera de las empresas de transporte intermunicipal de pasajeros, se puede observar porcentajes muy similares con respecto a la elaboración de los estados financieros básicos en su totalidad y con menor regularidad la aplicación de notas a los estados financieros pues 8 de las 12 empresas realizan las notas.

Por su parte, la aplicación de indicadores financieros refleja que las empresas utilizan los diferentes mecanismos financieros de medición y análisis, como se puede observar en la siguiente gráfica los indicadores financieros de mayor uso en su orden de aplicación según la encuesta realizada son la liquidez, la rentabilidad, el endeudamiento, el riesgo financiero y la solvencia respectivamente. En la Figura 4 se detalla la aplicación que realizan las empresas respecto a los indicadores financieros. Se observa que, de las 12 empresas, 11 utilizan los indicadores de liquidez, 10 los de rentabilidad, 1 la solvencia, 2 analizan el riesgo financiero y 6 aplican indicadores de endeudamiento.

4.1.4 Aspectos de los servicios ofertados

Las empresas de transporte ofrecen diferentes servicios lo que garantiza la calidad y la satisfacción de los clientes, con el paso del tiempo las empresas de transporte intermunicipal de pasajeros han modernizado sus vehículos y la forma en que se presta el servicio lo que las ha favorecido en gran medida; aun así los empresarios enfrentan retos y es evidente que el mayor problema que poseen actualmente es el transporte

informal, el cual causa grandes desafíos al momento de enfrentarse a la competencia entre el gremio y la estabilidad económica para sus colaboradores, como segundo reto el cumplimiento de tributos al estado, seguido de la malla vial y la delincuencia. A continuación, la Figura 5 muestra los retos empresariales a los que se ven expuestas las empresas en su operación normal.

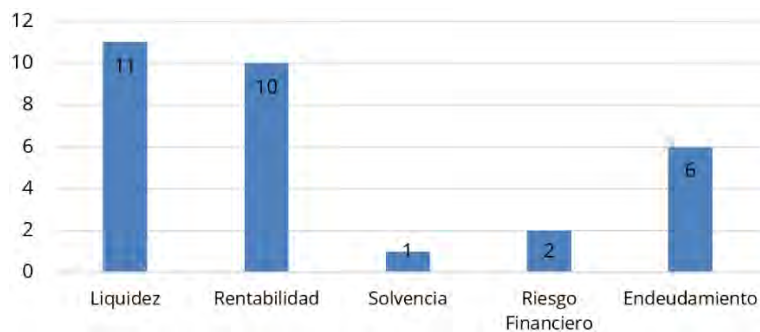


Figura 4. Aplicación de indicadores financieros



Figura 5. Retos de las empresas de transporte intermunicipal

De otro lado, las Tecnologías de la Información y la Comunicación hacen parte de la vida de las personas y aplicado a los servicios de transporte aumenta el nivel ventas, lo que favorece a las empresas en cuanto al crecimiento y competitividad frente a otras organizaciones.

De acuerdo con los datos obtenidos, las empresas objeto de estudio manejan las TIC lo que incide favorablemente en sus organizaciones, en un 92% las empresas ofertan sus servicios en la página web seguido en un 83% en las redes sociales, todo lo anterior con el fin de ampliar sus portafolios de servicios y mantener su competitividad en el mercado.

Finalmente es pertinente mencionar que gran parte de estas empresas prestan servicios adicionales como el de carga de mercancías, correo y mensajería, turismo y alquiler de vehículos y hasta venta de combustibles.

5. CONCLUSIONES

La Cámara de Comercio de Bucaramanga mediante su plataforma Compite 360 refleja que, a la fecha de esta investigación, se encuentran inscritas en su base de datos y con domicilio principal en la ciudad, 22 empresas de transporte intermunicipal. De estas, se realizó el estudio con 12 empresas, de las cuales la mayor parte de la población objetivo están constituidas legalmente como empresas limitadas y en una proporción muy pequeña como sociedades anónimas, conformación que ha facilitado a las empresas proyectarse y conseguir una gran experiencia por el tiempo que llevan en el mercado.

A estas empresas, se les aplicó un instrumento de recolección de información a fin de determinar los factores internos y externos que giran a su alrededor y que de cierta forma inciden en sus arcas y crecimiento. Esta herramienta indagó sobre aspectos generales, de recurso humano, contable-financieros y servicios ofertados. Una vez utilizado el instrumento se determinó que los vehículos de transporte intermunicipal, constituyen un modelo de negocio tipo afiliación, en donde terceros se vinculan con sus

vehículos a una empresa de manera legal, articulada y organizada para prestar sus servicios, lo que refleja en sus propietarios un negocio rentable.

No obstante, y en contraste con lo anterior el transporte ilegal e informal de los últimos tiempos ha disminuido el flujo de caja de las empresas legalmente constituidas, ya que estas últimas acarrean con costos derivados de mantener una nómina, gastos administrativos y otros gastos operacionales poniendo en desventaja sus servicios con los precios de tiquetes e incluso con los tiempos de respuesta al prestar el servicio.

A nivel general, el 92% de las empresas han logrado mantenerse en el mercado por más de 30 años consolidándose incluso como las más prósperas en esta modalidad de transporte, capaces de generar empleo y valor empresarial. Si bien, cuatro de las empresas estudiadas conforman una nómina de más de 200 empleados, contribuyendo a la disminución del desempleo en la ciudad, también es cierto que los salarios oscilan entre 1 y 3 salarios mínimos mensuales legales vigentes tanto para conductores como para personal administrativo y comercial.

Financieramente, es importante indicar que las empresas de este sector preparan los estados financieros y aplican algunos indicadores financieros, logrando estar informados para la toma de decisiones y proyectando nuevos servicios que generan ingresos como lo son turismo, alquileres de vehículos propios, venta de combustibles y lubricantes hasta giros y encomiendas.

Entre los indicadores financieros de preferencia en el sector, se encuentran los de liquidez y rentabilidad en gran proporción, pero muy lejos se encuentran las mediciones de solvencia y riesgo financiero y el endeudamiento. Esto sin duda deja en manifiesto que los empresarios buscan inmediatez en su manejo de dinero, pero muy poco estudian la salud financiera de sus negocios a futuro.

Para terminar, es importante resaltar que aún en tiempos modernos y digitales, las empresas se han quedado con el uso de páginas web frente al uso de redes sociales, siendo estas últimas una tendencia que llegan a una mayor cantidad de personas y que sí son utilizadas por el transporte no legal; esto se ratifica dado que las 12 empresas estudiadas coinciden en que la mayor amenaza a la que se enfrentan es la del transporte ilegal seguido de ellas los impuestos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo en la investigación de los estudiantes Eugenia Patricia Joya Arenales y Andy Hebert Rentería Cuaji.

REFERENCIAS

- [1] Andi. (2022). Sector transporte terrestre de pasajeros en Colombia. Asociación Nacional de Industriales. Recuperado: <http://www.andi.com.co/Uploads/SECTOR%20TRANSPORTE%20TERRESTRE%20DE%20PASAJEROS%20POR%20CARRETERA%20EN%20COLOMBIA%20VF.pdf>
- [2] Mora D. (2021). Terminal de transporte terrestre 'portal Llano'. Trabajo de grado. Universidad Piloto de Colombia.
- [3] Supertransporte. (2017). Diagnóstico de infraestructura Terminales de transporte terrestre automotor de pasajeros por carretera. Recuperado: https://www.supertransporte.gov.co/documentos/2017/Noviembre/Planeacion_22/2/DIAGNOSTICO_INFRAESTRUCTRA_TERMINALES_2017.pdf
- [4] Mendoza M. (2021). Propuesta de diseño arquitectónico de terminal de transporte terrestre departamental en la ciudad de Riohacha. Trabajo de grado. Universidad Santo Tomás.
- [5] Camargo Y. (2019). Historicidad del transporte en Colombia - Un proceso de transición y rupturas. Revista de Estudios Históricos 69, 198-199.
- [6] Duque G. (2022). El transporte en Colombia. Recuperado: <https://godues.wordpress.com/2007/04/16/el-transporte-en-colombia2/#:~:text=La%20revoluci%C3%B3n%20en%20el%20transporte,a%C3%B1os%2030%20para%20lograr%20algunos>
- [7] Findeter. (2021). Estudio del sector transporte colombiano. Jefatura de Inteligencia de Negocio - Coordinación de Inteligencia Externa.
- [8] Consejo Privado de Competitividad, (2021). Informe nacional de competitividad. Infraestructura, transporte y logística. Editorial Punto Aparte.

- [9] Bettera M. y Montero M. (2019). Geografía y transporte: Construcción de materiales educativos multimediales y de secuencias didácticas para el nivel secundario y superior. Editorial UniRío.
- [10] Zambrano J. et al. (2020). Transporte terrestre público y su incidencia en la demanda turística del cantón Sucre-Manabí. Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN 4(7), 46-59.
- [11] Pinedo G. (2022). Políticas públicas de transporte terrestre y normativa peruana en el marco del COVID 19. Revista Científica Multidisciplinaria 6(2), 67-78.
- [12] Vega R. (2018). Metodología para determinar el punto de equilibrio operativo en las rutas de una empresa de transporte terrestre intermunicipal de pasajeros mediante la utilización de la elasticidad precio-demanda. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia.
- [13] Angulo L. et al. (2018). Impacto del transporte internacional en el desarrollo económico de Colombia. Revista Liderazgo estratégico 8(1), 8-9.

Diseño, implementación y validación de un sistema Manufacturing Resource Planning MRP en una MiPyme del sector textil bajo un enfoque *Back to Order*

Jhon Edward Aguirre Cuervo¹
Silvana Ruiz Moreno²
Farley Albeiro Restrepo Loaiza³
Jim Giraldo Builes⁴
Iván Darío Rojas Arenas⁵
Institución Universitaria Pascual Bravo
Colombia

Actualmente, el sector textil confección presenta un reto frente a la apropiación de tecnologías como el Manufacturing Resource Planning MRP para el control de los procesos. Esto se debe a factores como costos, desconocimiento y dificultades que limitan su aplicación. Este capítulo se enfoca en el diseño, implementación y validación de un sistema MRP en una Mipyme del sector textil confección bajo un enfoque Back to Order. De esta manera se realizó una investigación con enfoque cuantitativo en la que, a partir de un diagnóstico del proceso productivo, se realizó un análisis de los requisitos del sistema acordes con las necesidades de la empresa, para finalmente diseñar, implementar y validar el sistema MRP. Entre los principales hallazgos se encuentra que la empresa no contaba con la caracterización del proceso, por lo que desconocía los puntos críticos del mismo y se dificulta el control de la producción. De esta manera la implementación de un sistema como el desarrollado generó un cambio positivo, con un incremento en la eficiencia cercano al 26%.

¹ Ingeniero Industrial y Magíster en Dirección de Operaciones y Calidad.
Contacto: je.aguirre@pascualbravo.edu.co

² Ingeniera Industrial y Magíster en Ingeniería Industrial.
Contacto: silvana.ruiz@pascualbravo.edu.co

³ Ingeniera de Productividad y Magíster en Logística Integral.
Contacto: f.restrepo@pascualbravo.edu.co

⁴ Administrador en Salud y Magíster en Gestión de Ciencia, Tecnología e Innovación.
Contacto: jim.giraldo@pascualbravo.edu.co

⁵ Ingeniero Industrial, Especialista en Logística Integral, Especialista en Gerencia Educativa y Magíster en Gestión de la Innovación Tecnológica, Cooperación y Desarrollo Regional.
Contacto: ivan.rojasar@pascualbravo.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El sector textil-confección está compuesto por una serie de empresas dedicadas a procesos secuenciales, en donde se manufacturan productos para uso comercial e industrial; es considerado uno de los más importantes en la economía por su contribución en la generación de empleo, la inversión y desarrollo industrial [1]. Sin embargo, para 2021 se presentó una disminución del 7% en la cantidad total de empresas reportadas, frente al 2020 donde se tenían en total 12981 según estadísticas del DANE [2].

Esto se podría explicar al considerar dificultades como la alta competencia, la contracción de la demanda, el contrabando, los altos costos de energía y la volatilidad del mercado actual que demanda una alta variedad de productos en ciclos de tiempos cada vez menores, y obviamente, el efecto pos pandemia [3]. Adicionalmente, este sector en el país tiene un marcado rezago tecnológico, lo cual afecta su competitividad, y se explica por la baja implementación de herramientas pertinentes que permitan gestionar información y procesos de forma eficiente [4, 5].

Ahora bien, en cuanto a la gestión de recursos al interior de las Pymes, es poco lo que se reconoce en términos de implementación de herramientas tecnológicas; de hecho se observa una baja apropiación de la Tecnología de la Información y Comunicaciones TIC, debido a factores como el costo de su adquisición e implementación, los bajos recursos que maneja en inversión para el mejoramiento continuo, el costo de innovación es elevado, ya que adicional a su implementación, requiere de modificaciones en su proceso productivo y calidad del mismo [6].

Pese a lo anterior, se ha podido evidenciar el uso de herramientas de gestión, tales como el Balanced Score Card BSC, en algunas empresas del sector textil-confección con relativo éxito, a partir del manejo de indicadores enfocados de forma estratégica en el cumplimiento de objetivos misionales, y como ayuda para la toma de decisiones [7].

Así mismo, en términos tecnológicos, se puede evidenciar, aunque de forma precaria, la implementación de software Enterprise Resource Planning ERP, con diferentes niveles de complejidad, los cuales integran de forma modular, aplicativos para la administración de los recursos financieros, administración del talento humano, planificación de compras e inventarios, gestión logística de inventarios, entre otros.

El ERP los une como un sistema integrado, parametrizable y práctico que permite que todos los procesos de una industria se compartan de manera simultánea y se tenga información de los mismos en tiempo real [8]. Entre ese conjunto de programas se encuentra el módulo de planificación de requerimientos de materiales y control de producción MRP, que tiene como principal objetivo la planeación, ejecución y control de la producción.

Este módulo puede trabajar tanto en un sistema integrado por un ERP o de manera independiente de acuerdo a las necesidades de cada empresa [9]; sin embargo, una de sus principales restricciones es su poca accesibilidad por los altos costos que puede generar la compra de un software ERP o el mismo módulo MRP.

Por las razones expuestas la implementación de una herramienta como un MRP es un reto para estas empresas que no cuentan con los recursos para su implementación, validación y funcionamiento, de allí que generalmente recurran al uso de herramientas más simples y menos costosas, como lo son tablas y macros de Excel, o incluso el manejo de inventarios e información contable de forma manual, en cuadernos de notas.

Así las cosas, este trabajo se enfocó en el desarrollo de una herramienta de MRP para una Mipyme del sector textil confección, por medio de una estrategia Back to Orden. En la primera parte del texto se presentan los fundamentos teóricos para el desarrollo de la herramienta, posteriormente se explica el desarrollo metodológico, para finalmente mostrar los resultados, análisis y conclusiones, así como los referentes teóricos utilizados en el artículo.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Gestión de la producción

Para [10] la gestión es el proceso de coordinar, dirigir y ejecutar una serie de actividades que tiene por objetivo desarrollar un beneficio para la organización. Cuando se refiere al concepto de gestión de la producción se relaciona con el desarrollo de actividades de planificación y control en la transformación de un bien o servicio por medio de sistemas que apoyen su correcto funcionamiento en la organización. Según [11, 12], gestionar de forma adecuada el sistema productivo en la empresa produce beneficios que impactan los niveles de eficacia, eficiencia, calidad del servicio y relacionamiento con los clientes. De esta manera, metodologías como el Back To Order permiten una gestión de dicho sistema a partir del análisis de las variables que definen la capacidad instalada de la empresa, para, para, de esta manera, diseñar herramientas con las que se impacten los indicadores de resultados de la organización.

Una empresa que trabaja bajo un ambiente de Back to Order, debe tener en cuenta que las órdenes de pedido son variables en cantidad y variedad (referencias), lo que exige un nivel alto de flexibilidad en los procesos para mantener un nivel óptimo de cumplimiento, utilizando el máximo de capacidad productiva sin incurrir a sobre costos, y, por ende, sin afectar la utilidad [13]. Es preciso anotar que la capacidad productiva de una organización del sector textil-confección se ve influenciada por variables que a su vez influyen en el cálculo del tiempo disponible, siendo un factor importante el talento humano. puesto que al fomentar el desarrollo de competencias laborales se aumenta la productividad y la competitividad de la organización [14]; lo anterior se complementa con la estandarización de los procesos, ya que esto permite el asignar las funciones y el personal adecuada para cada actividad dentro de los procesos productivos.

La estandarización inicia con la caracterización de los procesos y la definición del mejor método posible para realizar la producción, empleando metodologías como la Teoría de Restricciones TOC, con la cual se identifican los cuellos de botella de los procesos, iniciando con la identificación de las restricciones que se encuentren dentro de un proceso específico, para luego intervenir esta restricción buscando la mejor forma de aumentar su capacidad; posteriormente, se subordinan las fases del proceso con base al ritmo que establezca dicha restricción, y se implementan las acciones requeridas para eliminarla [15].

En la misma línea, la Manufactura Esbelta, [16] permite la incorporación de múltiples metodologías como: 5 S, Single-Minute Exchange of Die SMED, Análisis de valor agregado, Mantenimiento productivo total, Six Sigma y Kaizen, entre otros. En estas metodologías prima la disminución de los diferentes desperdicios que genera una organización es a través de la estandarización de las tareas, la identificación de procesos de valor agregado, el uso de control visual, el desarrollo de una cultura organizacional, el control total y en línea.

Las metodologías con enfoque al mejoramiento continuo tienen como fuente principal de información los indicadores de resultados de la organización, los cuales miden el impacto de las estrategias establecidas para su mejoramiento [17], Dichos indicadores se establecen según la empresa y el proceso, y se convierten en una herramienta importante para la toma de decisiones, ya que su implementación facilita el proceso de seguimiento y gestión de producción [18].

2.2 Balanceo de módulos de trabajo

Uno de los retos más importantes en un proceso de producción, es balancear las cargas en la línea de trabajo; de acuerdo con [19] este proceso se inicia con la caracterización del número de actividades que se requiere para la elaboración de cada uno de los productos, esto tiene como objetivo la organización de actividades en grupos y que cada grupo de actividades se desarrolle en una sola estación de trabajo en el menor tiempo posible, buscando reducir los tiempos ociosos. En lo cual coincide [20] y agrega que una línea de trabajo se considera equilibrada, cuando se garantice que los tiempos de las estaciones sean exactamente iguales, aprovechando al máximo los recursos, se dice entonces que la línea tiene un equilibrio perfecto; algo por sí mismo muy complicado de lograr.

Para lograr balancear un módulo de trabajo lo más ajustado posible al equilibrio perfecto, [21] plantean tres opciones que se pueden aplicar a un proceso industrial: el modelo básico MB, Simple Assembly Line Balancing Problem SALBP y General Assembly Line Balancing Problem GALBP.

El MB es una buena opción cuando el módulo de trabajo se diseña por primera vez, ya que busca resolver problemas en el balance de las cargas, asignando un número óptimo de operarios en una línea de producción. Para lograrlo se debe conocer el número, secuencia y tiempos de producción de cada operación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el modelo no considera estaciones de trabajo donde los operarios realicen más de una actividad en un turno de trabajo.

El modelo SALBP, es ideal para los módulos de trabajo que se encuentran definidos previamente, aportando un incremento en la eficiencia de la productividad, mediante la creación de estaciones de trabajo. Si bien tiene cierta similitud con el modelo anterior, SALBP permite ajustarse a las metas particulares de producción. Por ejemplo, [22] plantean que SALBP-I es utilizado cuando se conoce el tamaño de lote, SALBP-II se emplea cuando se desconoce el tamaño de lote y se busca disminuir el número de estaciones de trabajo.

Por último, el modelo GALBP se enfoca en balancear las cargas de trabajo en las líneas de producción más complejas, en este sentido, [23] menciona que el modelo GALBP es utilizado con mayor frecuencia en líneas de producción en U, mixtas, automatizadas y multiobjetivo, donde se evidencian estaciones de trabajo configuradas paralelamente, que cuentan con flexibilidad en el procesamiento y en los tiempos de producción.

Autores como [21, 24] coinciden que el balanceo de módulos de trabajo, tienen un doble efecto sobre la productividad, relacionado de forma directa con la tasa de producción y de forma inversa con los costos de producción, estas bondades conllevan a la eficiencia de los procesos. De igual forma que el efecto positivo del balanceo tiene alta aplicabilidad sobre todos los sistemas de producción.

2.3 Sistemas de producción

En [25] se definen los sistemas de producción, como las actividades donde se planifican, organizan, dirigen, controlan y evalúan los procesos de fabricación, procurando que los costos, calidad, cantidad y tiempos sean los adecuados. En lo que concuerda [26] y adiciona que los sistemas de producción dependen de la relación que existe entre la oferta y la demanda en los mercados, del impacto que generan las grandes industrias mundiales y los avances tecnológicos. Todo esto se da en el marco del proceso constante de evolución de la sociedad, que genera retos y cambios continuos de los procesos productivos, los cuales se deben ajustar a un mercado cambiante. En cuanto a los sistemas de producción [25] plantea la siguiente clasificación:

- *Producción por producto*: por lo general es un proceso artesanal, donde la fabricación depende de las necesidades particulares de cada cliente. Se caracteriza por volúmenes bajos de pedido, diversidad de diseños de producto y fluctuación en los tiempos de entrega.
- *Producción en masa*: se refiere a la fabricación de productos uniformes en grandes volúmenes, en la actualidad no se enfoca en la producción de productos uniformes, sino en la fabricación de piezas uniformes, que permitan una flexibilidad en la oferta de productos.
- *Producción por proceso*: hace referencia al producto que se traslada de un proceso a otro en su fabricación, buscando cumplir con un justo a tiempo. Es difícil que las plantas que trabajan con este sistema sean perfectamente continuas, por la poca flexibilidad que tienen sus equipos al momento de hacer un cambio de referencia, lo que genera que se fabrique durante un tiempo limitado cierto tipo de pieza, se detengan las máquinas y se realicen los ajustes, para iniciar con la fabricación de un nuevo producto, generando que se busque la eficiencia en sus equipos de trabajo y la automatización de sus procesos.

- *Producción por grupos tecnológicos*: este sistema de producción permite el agrupamiento de piezas comunes (familias), para ser procesadas en una línea de producción flexible, permitiendo simplificar el control de producción, pues se ejerce sobre un conjunto de grupos compuesto por piezas similares.

Para [27] los sistemas de producción deben estar en una constante renovación y siempre tendiendo hacia la automatización, haciendo más evidente la necesidad de mayor control y seguridad en los procesos, incluso si fuese posible, sin operarios. De acuerdo con [26], la globalización ha permitido que la producción sea más internacional, en el sentido que en un país se realice el diseño, las partes sean de otros y el ensamble se realice en un territorio totalmente diferente. Todo esto gracias a los planes maestro de producción en los cuales se habla de Material Requirements Planning MRP, sistemas de pedidos para mejorar los métodos de entrega y de producción en las empresas.

2.4 Herramientas MRP

En la actualidad, el mercado presenta un aumento acelerado de la demanda de bienes y servicios a escala internacional, que genera retos a las organizaciones; según [28] son estas las que deben establecer capacidades de respuesta, para crear y mantener una ventaja competitiva frente a sus rivales, empleando herramientas de gestión que permitan planificar y lograr la flexibilidad en las entregas a sus clientes.

[29] plantean que las empresas en crecimiento se enfrentan a problemas de inventarios excesivos, retrasos en las entregas, sobre costos de producción y problemas en la calidad de sus productos, generando pérdidas económicas y de participación en el mercado, que pueden ser corregidas con un sistema de Planeación de Requerimientos de Materiales (MRP), la cual puede llegar a convertirse en una fuerte ventaja competitiva y sostenible en el tiempo.

De acuerdo con [28] el MRP es un sistema de empuje, que proporciona un programa de producción para el manejo de la materia prima, para esto requiere información tanto del proceso productivo como de la demanda de los productos, en su aplicación requiere de un alto nivel de organización, sincronía y significativa cantidad de cálculos de acuerdo a la complejidad del programa, para lo cual se requiere de un software especializado para el procesamiento de la información. En [29] indican que para el sistema MRP es necesario contar con los siguientes datos de entrada:

- *Plan maestro de producción MPS*: se construye con el pronóstico de la demanda, determinando la cantidad de los productos terminados y el periodo de tiempo necesario para producir, dentro del horizonte de planeación.
- *Lista de materiales BOM*: se identifica la estructura de los productos terminados, especificando los subcomponentes, cantidad requerida en cada nivel, secuencia de ensamble y centros de trabajo que intervienen en el ensamble.
- *Registro de inventario* actualizado para cada uno de los artículos.

Los beneficios derivados de la implementación del MRP dependen de la calidad de los datos, sistema de información anterior y cultura organizacional, lo que podría asegurar:

- Mejoras sustanciales en el servicio al cliente
- Una planificación más efectiva
- Reducciones considerables de costos
- Mejoras en la gestión de compras e inventarios.

3. MÉTODO

El presente trabajo es de tipo cuantitativo, ya que se enfocó en la medición de variables como la jornada laboral, número de personas, tiempo estándar, número de unidades, eficacia, entre otro. Así mismo, su enfoque es descriptivo, toda vez que se efectúa la descripción de un objeto de estudio, a partir del análisis de las distintas variables que intervienen. El proyecto se desarrolló en tres etapas (Figura 1).



Figura 1. Fases del proyecto

1. Diagnóstico y caracterización del proceso: Esta primera etapa se realizan las siguientes actividades:
 - a. Diagnóstico inicial: por medio de observación directa del proceso y sus etapas con apoyo de la gerencia y el personal de la empresa
 - b. Caracterización del proceso: De acuerdo con la información anterior se establecen los pasos lógicos del proceso productivo teniendo en cuenta los diferentes escenarios posibles con los clientes actuales y futuros.

2. Análisis de requisitos: con el proceso definido, así como sus etapas, se definieron las variables necesarias para el funcionamiento y las necesidades requeridas del sistema:
 - a. Identificación y definición de variables: Con el proceso establecido y ordenado se identifican las variables que hacen parte del mismo, que aportan a su medición y control para establecerlas dentro de los requisitos del sistema para su funcionamiento.
 - b. Definición de requisitos para el sistema: Se establecen las necesidades del sistema para su funcionamiento, el programa a utilizar, los datos requeridos por la empresa, definir su temporalidad de acuerdo a las variables establecidas y los medios visuales para su control.

3. Diseño y validación de la herramienta. Finalmente, con la información completa se procede al desarrollo de la herramienta y su validación, a partir de las siguientes actividades:
 - a. Diseño de bases de datos y funcionalidad del sistema: Se define la ubicación de los datos solicitados de funcionamiento, se diseñan espacios donde por medio de funciones del programa que transforme los datos en las variables requeridas del sistema y finalmente se defina en un entorno de *visual management* el medio por el cual mostrar la información requerida para su futuro control y gestión para el cumplimiento de la metodología Back to Order.
 - b. Validación de la herramienta: Finalmente se realiza la validación de dicha herramienta por medio del ensayo dentro del entorno normal de operatividad de la empresa y validación del funcionamiento con el Gerente de la empresa para su posterior entrega.

El diseño de esta MRP se dio a partir de la necesidad de la creación de una herramienta acorde a la industria que aporte el desarrollo de sus actividades diarias y de mayor accesibilidad. De igual forma para su desarrollo y validación, el MRP debe cumplir con las siguientes condiciones [30]:

- Velocidad del flujo de la información
- Evidenciar la relación entre los diferentes agentes de la empresa (productividad, costos)
- Eficiencia y bajo en costo de mantenimiento
- Usabilidad por parte de los actores encargado del proceso
- Flexibilidad en el uso y adecuación en diferentes entornos

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La herramienta MRP tiene como meta realizar un registro y control desde el momento del pedido por parte del cliente hasta la facturación final del lote entregado, y presenta las siguientes características:

- Informe del estado del lote en cada etapa del proceso productivo
- Control diario y por cada hora de la producción de la planta
- Medición de la eficiencia de cada lote
- Control de la facturación hora a hora, diario y al final del mes
- Informe final de utilidad diaria y mensual

Estos informes están basados en un entorno visual que permite los operarios observar el seguimiento hora a hora de su proceso y al Gerente observar el acumulado en productividad, eficacia y facturación. Para el desarrollo de esta herramienta, su primera fase se realizó la caracterización del proceso donde se establece el paso lógico del funcionamiento de la organización desde el ingreso del pedido hasta su facturación final como se muestra en la Figura 2.

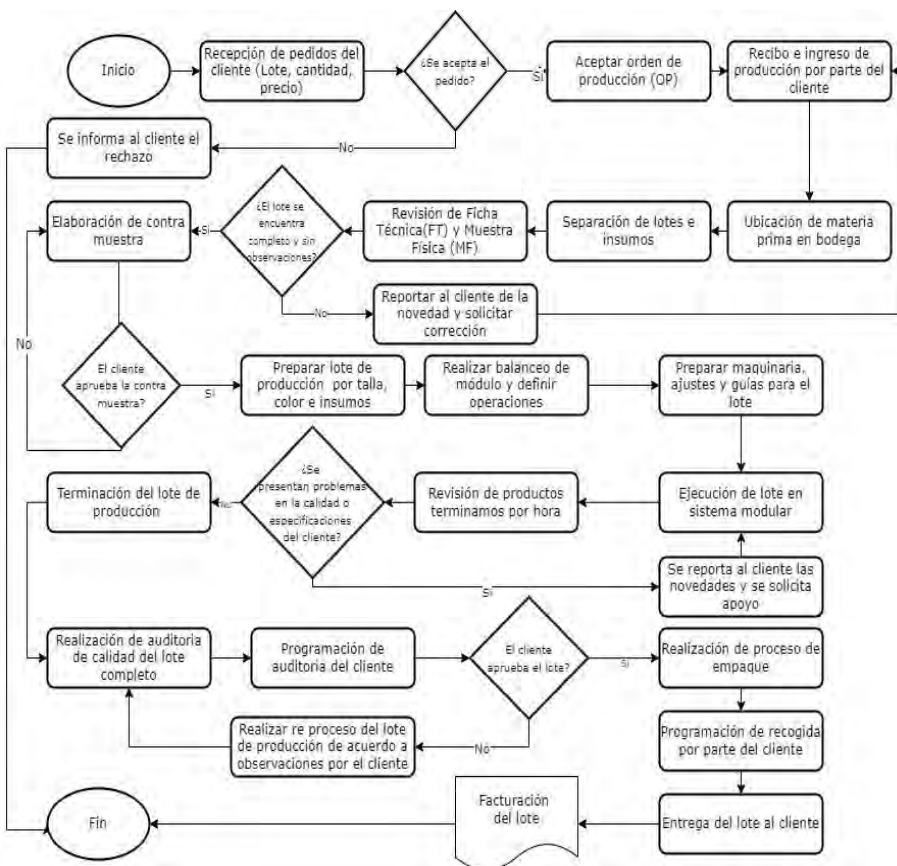


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso

Teniendo en cuenta el proceso definido y las funciones de todos los involucrados del mismo. Se inicia la fase 2 de análisis de requisitos del sistema, con el fin de establecer las variables requeridas para el funcionamiento del sistema y el control del proceso de acuerdo con su temporalidad como se demuestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables requeridas del sistema

Tipo	Variable	Descripción	Responsable
Interna	Número de operarios	Se establece el número de personal operativo a trabajar, puede variar por rotación de personal o variación de la demanda.	Gerente
	Jornada laboral	De acuerdo con la variación de la demanda se establece la jornada laboral, si se aumenta por medio de horas extras o se deja estable.	
	Punto de equilibrio mensual	Se define con apoyo de la contabilidad el punto de equilibrio del mes a trabajar.	

Tiempo estándar	Cuando se realiza la contra muestra se establece el tiempo estándar por unidad por medio de la toma de tiempo por operación. Con las variables anteriormente mencionada se establece el valor:	
Unidades meta x hora	$\# \text{ unidades meta} = \frac{\# \text{ Operarios} * \text{ Jornada laboral}}{\text{Tiempo estandar}}$	
Unidades real x hora	El número de unidades completas y que cumple con las características establecidas por la ficha técnica.	Supervisora
Unidades defectuosas	El número de unidades que incumplen características de la ficha o se encuentran incompletas.	
Eficacia	Es el resultado entre lo real y esperado: $\text{Eficacia} = \frac{\# \text{ unidades reales}}{\# \text{ unidades esperadas}}$ Se puede establecer por hora, día o mensual.	
Referencia del producto	Valor con el que se identifica el producto para el cliente	
Tipo de producto	Definición del tipo de producto, este valor puede realizar cambios en el tiempo estándar y el balanceo modular.	Cliente
Orden de producción	Número único que identifica el lote de producción en todo el programa	
Cantidad de unidades	Cantidad de unidades solicitadas por el cliente.	

Con las variables establecidas se inicia la fase 3 de diseño e implementación de la herramienta donde se procede al desarrollo de la herramienta por una serie de actividades y se define la ubicación de cada una de las variables que se deben ingresar:

- **Variables externas:** Se define un espacio *Seguimiento de Lotes* en el cual se ingresan todos los datos suministrados por el cliente, como se observa en la Figura 3.

INFORMACIÓN GENERAL DE CADA LOTE													
ESTADO LOTE	AÑO	F. Llegada lote	TULAS	MES PRODUCCIÓN	MES FACTURACIÓN	REFERENCIA	OP	ORDEN DE PRODUCCIÓN	CANT	PRECIO UNIDAD	VALOR LOTE	MÓDULO	TIPO DE FREMDA
ACTIVO	2021	28-oct	8	ENE	ENE	4213886	1145058	4500275425	168	\$ 16,970.40	\$ 2,851,027.20	T	CHAQUETA
ACTIVO	2021	29-oct	7	ENE	ENE	4213886	1137418	4500275497	81	\$ 16,847.62	\$ 1,364,657.22	T	CHAQUETA
ACTIVO	2021	30-nov	5	ENE	ENE	4213886	1137445	4500278588	350	\$ 16,970.40	\$ 5,839,640.00	T	CHAQUETA
ACTIVO	2022	11-ene	3	ENE	ENE	4113981	114515	4500281879	245	\$ 11,142.27	\$ 2,729,856.15	T	CHAQUETA
ACTIVO	2021	21-dic	15	ENE	FEB	4213891	112281	4500280335	675	\$ 11,844.64	\$ 7,995,132.00	T	CHAQUETA
ACTIVO	2022	11-ene	12	ENE	FEB	4113984	122239	4500281892	707	\$ 13,384.86	\$ 9,463,096.02	T	CHAQUETA
ACTIVO	2022	11-ene	18	ENE	FEB	4113995	123164	4500281896	505	\$ 15,333.35	\$ 7,743,341.75	T	BUZO
ACTIVO	2022	11-ene	27	FEB	FEB	5253330	123179	4500281907	625	\$ 15,512.55	\$ 9,695,343.75	T	BUZO
ACTIVO	2022	3-feb	24	FEB	FEB	5253330	123158	4500284510	477	\$ 15,870.89	\$ 7,570,414.53	T	BUZO
ACTIVO	2022			FEB	FEB	D85706	28828	IBLU	30	\$ 7,800.00	\$ 234,000.00	T	CHAQUETA
ACTIVO	2022	13-ene	23	FEB	FEB	5153099	123168	4500281897	598	\$ 13,988.36	\$ 8,365,039.28	T	BUZO
ACTIVO	2022	13-ene	25	FEB	FEB	5153099	123153	4500281909	585	\$ 13,988.36	\$ 8,183,190.60	T	BUZO

Figura 3. Variables suministradas por el cliente

- **Variables Internas:** En el caso de las variables internas que es suministrada por diferentes áreas de la empresa, se establecen en diferentes espacios su ingreso y se crea un tablero visual que integre los resultados, realizando las fórmulas mencionadas en las variables y evidenciando los resultados necesarios para su gestión.

En la Figura 4 se observa la información suministrada por parte de la gerencia cada mes, la cual incluye los valores a controlar como el número de operarios, la jornada laboral e información que se consideró necesaria por parte del empresario.

REPORTE ACUMULADO MENSUAL							
MES	# Días	FACTURACION ACUMULADA	PUNTO DE EQUILIBRIO	PE Diario	# Operarios	Jornada laboral	Valor Minuto
ENE	18	\$12,885,181	\$45,200,000	\$2,511,111.11	15	560	\$389
FEB	24	\$77,417,616	\$70,000,000	\$2,916,666.67	15	560	\$451
MAR	26	\$59,252,672	\$70,000,000	\$2,692,307.69	15	560	\$417
ABR	23	\$48,818,646	\$80,000,000	\$3,478,260.87	15	560	\$538
MAY	25	\$0	\$80,000,000	\$3,200,000.00	15	560	\$495
JUN	24	\$0	\$80,000,000	\$3,333,333.33	15	560	\$516
JUL	24	\$0	\$80,000,000	\$3,333,333.33	15	560	\$516
AGO	26	\$0	\$80,000,000	\$3,076,923.08	15	560	\$476
SEP	26	\$0	\$80,000,000	\$3,076,923.08	15	560	\$476
OCT	25	\$0	\$80,000,000	\$3,200,000.00	15	560	\$495
NOV	24	\$0	\$80,000,000	\$3,333,333.33	15	560	\$516
DIC	19	\$0	\$80,000,000	\$4,210,526.32	15	560	\$652

Figura 4. Variables suministradas por la Gerencia

Se definieron dos espacios adicionales para el ingreso de las variables por parte de la supervisión. El primer espacio, enfocado en el proceso de revisión de la FT y la producción de la contra muestra donde el área de supervisión establece dentro de esa actividad el tiempo estándar del producto por medio de un estudio de métodos y tiempos. Después de ser aceptado el producto por parte del cliente se ingresa la información en el espacio anteriormente definido como *Seguimiento de Lotes* como se evidencia en la Figura 5.

INFORMACIÓN GENERAL DE CADA LOTE							ANÁLISIS DE LOTE				
REF	OP	OC PEDIDO	CANT	PRECIO UNIDAD	VALOR LOTE	MÓDULO	PUNTO DE EQUILIBRIO DIARIO	META	TIEMPO DE LOTE (PE) HORAS	TIEMPO DE LOTE META HORAS	UNIDADES META HORA
4213886	114505B	4500275425	168	\$ 16,970.40	\$ 2,851,027.20	T	\$2,511,111	\$3,264,444	10.56	8.12	21
4213886	113741B	4500275497	81	\$ 16,847.62	\$ 1,364,657.22	T	\$2,511,111	\$3,264,444	5.05	3.89	21
4213886	113745	4500278568	350	\$ 16,970.40	\$ 5,939,640.00	T	\$2,511,111	\$3,264,444	22.00	16.92	21
4113981	114515	4500281879	245	\$ 11,142.27	\$ 2,729,856.15	T	\$2,511,111	\$3,264,444	10.11	7.78	32
4213891	112281	4500280335	675	\$ 11,844.64	\$ 7,995,132.00	T	\$2,511,111	\$3,264,444	29.61	22.78	30
4113984	122239	4500281892	707	\$ 13,384.86	\$ 9,463,096.02	T	\$2,511,111	\$3,264,444	35.05	26.96	27
4113995	123164	4500281896	505	\$ 15,333.35	\$ 7,743,341.75	T	\$2,511,111	\$3,264,444	28.68	22.06	23

Figura 5. Variables de tiempo estándar y unidades meta por hora

El segundo espacio donde se ingresa la información por parte de la supervisión es el seguimiento hora a hora, donde se ingresa, cada día la producción de unidades completa y defectos que se generen, el mismo formato de manera automática calculará la eficacia de cada hora, el promedio de unidades hora y el reporte de observaciones que se generen durante el día como se observa en la Figura 6.

MES	DIA	MÓDULO	REFERENCIA	OP	PRODUCCIÓN																META	TOTAL
					HORA 1	HORA 2	HORA 3	HORA 4	HORA 5	HORA 6	HORA 7	HORA 8	U	D	U	D	U	D	U	D		
ENE	11 ene	T	4213886	114505B	0	0	0	0	0	0	20	0	19	0	10	0	43	49				
ENE	12 ene	T	4213886	114505B	20	0	20	0	19	0	18	0	20	0	22	0	43	119				
ENE	12 ene	T	4213886	113741B											15	0	43	50				
ENE	13 ene	T	4213886	113741B	10	0	21	0									43	31				
ENE	13 ene	T	4213886	113745				21	0	21	0	23	0	23	0	20	0	43	162			
ENE	14 ene	T	4213886	113745	19	0	20	0	17	0	18	0	19	0	20	0	25	0	43	188		

Figura 6. Reporte de unidades hora a hora

Toda esta información queda resumida en un tablero, obteniendo como resultado los datos reales y en línea hora a hora del proceso y los módulos que trabajan, adicional las observaciones ya sea por problemas que presenten o reportes de restricciones y el cálculo de Eficiencia por hora, por cada módulo y al final del día como lo demuestra la Figura 7.

MOD	OP	META	FECHA	AUSENTISMOS								TIEMPOS IMPRODUCTIVOS				EFICIENCIA	
		0	29-abr	0-DANIELA AREIZA-100								T5*Falta de instrucción-500					
		123171	27														
T	HORAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL	80%		
	UNIDADES	22	22	22	22	22	22	22	22	22	19	0	0	217			
	DEFECTOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	META	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	0	0	270			
	EFICIENCIA	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	70%		80%			

Figura 7. Control visual Productividad y Eficiencia

Adicionalmente se crea un informe financiero dirigido a la Gerencia donde se obtiene resultados de productividad diaria, eficiencia, facturación diaria (Número de unidades producidas * Precio pagado por unidad), teniendo en cuenta el punto de equilibrio definido por la misma Gerencia se calcula la utilidad diaria y acumulativa de cada mes como se muestra en la Figura 8.

Finalmente, en la última fase de validación de dicha herramienta, se realiza por medio del ensayo dentro del entorno normal de operatividad de la empresa como se observa en las figuras anteriores; así mismo, se hizo entrega oficial a la Gerencia para su puesta en funcionamiento en la empresa.

FECHA	T	TOTAL FACT	EFICIENCIA	PUNTO DE EQUILIBRIO	UTILIDAD	META	DIFERENCIA
ENE							
11-ene	\$831,549.60	\$831,550	14%	\$2,511,111	-\$1,679,562	\$3,264,444	-\$2,432,895
12-ene	\$2,867,997.60	\$2,867,998	38%	\$2,511,111	\$356,886	\$3,264,444	-\$396,447
13-ene	\$3,275,287.20	\$3,275,287	42%	\$2,511,111	\$764,176	\$3,264,444	\$10,843
14-ene	\$3,190,435.20	\$3,190,435	44%	\$2,511,111	\$679,324	\$3,264,444	-\$74,009
15-ene	\$334,268.10	\$334,268	12%	\$2,511,111	-\$2,176,843	\$3,264,444	-\$2,930,176
17-ene	\$2,395,588.05	\$2,395,588	50%	\$2,511,111	-\$115,523	\$3,264,444	-\$868,856
18-ene	\$1,599,026.40	\$1,599,026	29%	\$2,511,111	-\$912,085	\$3,264,444	-\$1,665,418
19-ene	\$2,001,744.16	\$2,001,744	37%	\$2,511,111	-\$509,367	\$3,264,444	-\$1,262,700
20-ene	\$3,198,052.80	\$3,198,053	59%	\$2,511,111	\$686,942	\$3,264,444	-\$66,392
21-ene	\$240,927.48	\$240,927	26%	\$2,511,111	-\$2,270,184	\$3,264,444	-\$3,023,517
22-ene	\$1,458,949.74	\$1,458,950	42%	\$2,511,111	-\$1,052,161	\$3,264,444	-\$1,805,495
24-ene	\$2,502,968.82	\$2,502,969	43%	\$2,511,111	-\$8,142	\$3,264,444	-\$761,476
25-ene	\$2,610,047.70	\$2,610,048	37%	\$2,511,111	\$98,937	\$3,264,444	-\$654,397
26-ene	\$2,636,817.42	\$2,636,817	26%	\$2,511,111	\$125,706	\$3,264,444	-\$627,627
27-ene	\$567,333.95	\$567,334	8%	\$2,511,111	-\$1,943,777	\$3,264,444	-\$2,697,110
28-ene	\$3,204,670.15	\$3,204,670	45%	\$2,511,111	\$693,559	\$3,264,444	-\$59,774
29-ene	\$1,870,668.70	\$1,870,669	44%	\$2,511,111	-\$640,442	\$3,264,444	-\$1,393,776
31-ene	\$2,085,335.60	\$2,085,336	49%	\$2,511,111	-\$425,776	\$3,264,444	-\$1,179,109
TOTAL	\$36,871,669	\$36,871,669	35%	\$45,200,000	-\$8,328,331	\$58,760,000	-\$21,888,331

Figura 8. Informe mensual financiero

Dentro de los resultados obtenidos con la herramienta MRP, se puede evidenciar que en el primer periodo de implementación se pudo llevar a cabo el control en una línea de tiempo a la hora, día y mes, brindando la información necesaria al Gerente para tomar diferentes acciones correctivas que generan un impacto en la organización, calculando la eficacia como se explica en la tabla 1; los resultados obtenidos de los siguientes periodos se muestran en la Figura 9.

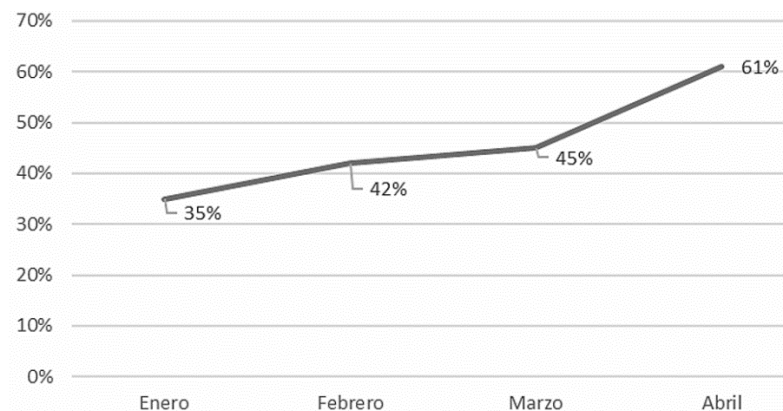


Figura 9. Comportamiento de la eficacia

Se puede evidenciar en relación con la figura anterior el impacto positivo que generó el desarrollo del proyecto, desde la caracterización e implementación de la herramienta, se observa un aumento comparativo del primer al cuarto periodo de 26% de eficacia.

5. CONCLUSIONES

Las generaciones de proyectos de investigación lideradas por las Instituciones de Educación Superior deben ir enfocada a la solución de problemáticas en entornos reales donde se impacte de manera directa o indirecta de manera positiva el desempeño y el crecimiento de las pequeñas, mediana y gran empresa, tanto en el sector público como privado.

La implementación de un sistema MRP es ideal en las industrias del sector manufacturero, ya que se convierte en una herramienta fundamental de control de sus procesos y obtener la información de manera óptima para la toma de decisiones, en el caso de esta industria se puede evidenciar un impacto positivo del 26% en relación con sus resultados en relación de sus metas propuestas.

En el sector textil-confección genera un gran impacto tener acceso a este tipo de sistemas. Sin embargo, el nivel de oportunidad de su adquisición es baja por su alto costo y exigencias que pueda tener dependiendo del tipo de MRP.

Las principales ventajas del proyecto es su bajo costo, esto a razón del uso de herramientas y software libre, adicional el diseño a la medida del proceso genera un mayor impacto en los datos recolectados y los resultados al final en los informes evidenciados. Esto se convierte en un generador de valor a la empresa y tener la capacidad de mejorar y salir a competir en el mercado actual.

La implementación de esta herramienta con un enfoque Back to Order fue un reto importante, por la necesidad de la información en línea, para dar respuesta rápida a las necesidades de los clientes y una planeación más acertada en la entrega de los productos y servicios que puede ofrecer. Otro factor de vital importancia fue la caracterización de los procesos, definición de las variables y su fuente, debido a que se requiere de esta información para poder tener un funcionamiento óptimo de la herramienta.

Finalmente se puede concluir en primera instancia la importancia de que las Instituciones participen de manera activa en la solución de problemáticas del sector manufacturero y el segundo factor es que las industrias deben tener un enfoque hacia el mejoramiento continuo, para esto se requiere mantener un contacto constante con las nuevas tecnologías y tendencias que aporte al cumplimiento de las metas que tiene la empresa.

REFERENCIAS

- [1] Clavijo N. y Guadrón C. (2019). Los sistemas de gestión de costos en la industria textil en Colombia. *Revista ingeniería, matemáticas y ciencias de la información* 7(13), 73-79.
- [2] DANE. (2021). Geovisor directorio de empresas 2020. Departamento Nacional de Estadística.
- [3] Zuluaga A. et al. (2018). Gestión logística en el sector textil-confección en Colombia: Retos y oportunidades de mejora para la competitividad. *Revista CLIO América* 12(23), 98-108.
- [4] Salazar K. et al. (2014). Análisis del ciclo de vigilancia tecnológica en las empresas del sector textil del centro sur de Caldas. *Scientia et Technica* 19(1), 35-41.
- [5] Aguilar P. et al. (2018). Principales problemas de las pymes por falta de información oportuna generada en sus sistemas contables. *Revista de investigación académica sin fronteras* 11(28), 1-20.
- [6] Gutiérrez J. et al [2013]. Dimensión de la gestión tecnológica en las pymes. *Perspectiva colombiana* 34(2) 13-24.
- [7] Parra L. et al. (2020). Planificación estratégica administrativa para pymes en tiempos post Covid. Caso de estudio de empresa textil para la toma de decisiones 2019-2020. *Research Journal* 5(3).
- [8] Acosta R. et al. (2016). Diseño de un sistema de planificación de recursos empresariales. *Inge CUC* 13(1), 9-18.
- [9] Bustos C. y Chacón, G. (2007). El MRP en la gestión de inventarios. Recuperado: <https://www.redalyc.org/pdf/4655/465545875010>
- [10] Hidalgo Y. y Yera C. (2016). Sistema de gestión de la producción en la empresa SUCHEL CEPIL. *Universidad & ciencia* 5(1), 122-136.
- [11] Sierra M. et al. (2018). Sistema de gestión de la productividad del sector servicio en el municipio San Cristóbal del estado Táchira, Venezuela. *Revista ciencia UNEMI* 11(26), 63-78.
- [12] Cespón R. et al. (2005). La selección del sistema de gestión de la producción en empresas manufactureras. *Scientia et Technica* 2(31),183-188.
- [13] Arredondo G. et al. (2016). Modelo de planeación y control de la producción a mediano plazo para una industria textil en un ambiente make to order. *Revista de ingenierías* 16(30), 169-193.
- [14] Herrera M. et al. (2020). Competencias laborales específicas en el sector textil y de confección. *Revista arbitrada interdisciplinaria koinonía* 5(3), 4-35.
- [15] Ortiz M. (2013). Teoría de restricciones y modelación PL como herramientas de decisión estratégica para el incremento de la productividad en la línea de toallas de una compañía del sector textil y de confecciones. *Prospect* 11(1), 21-29.
- [16] Arrieta K. (2015). Diseño de una metodología que relaciona las técnicas de manufactura esbelta con la gestión de la innovación: una investigación en el sector de confecciones de Cartagena. *Unive. & empresa* 17(28), 127-145.
- [17] Zambrano F. et al. (2020). Implementación de un modelo de gestión para empresas textiles artesanales: caso Almacenes Coronado. *Digital publisher CEIT* 5(6), 229- 41.
- [18] Paredes J. (2018). Gestión de producción y crecimiento económico de la microempresa de producción textil en Riobamba – Ecuador. *Quipukamayoc* 26(52), 19-29.
- [19] Nahmias S. (2007). Análisis de la producción y las operaciones. McGraw-Hill.
- [20] Restrepo J. et al. (2006). Balanceo de un módulo de confección utilizando el algoritmo de Helgeson and Birnie: Un caso de estudio. *Scientia et Technica* 3(32), 325-330.
- [21] Yépez I. y Doukh N. (2021). Impacto del balanceo de las cargas de trabajo en la productividad de la pequeña empresa de confección textil de Imbabura. *Ecuadorian Science Journal* 5(3), 138-151.

- [22] Michels A. et al. (2020). An exact method with decomposition techniques and combinatorial Benders' cuts for the type-2 multi-manned assembly line balancing problem. *Operations Research Perspectives* 7.
- [23] Pearce B. et al. (2019). An effective integer program for a general assembly line balancing problem with parallel workers and additional assignment restrictions. *Journal of Manufacturing Systems* 50, 180-192.
- [24] Peña O. et al. (2019). An effective integer program for a general assembly line balancing problem with parallel workers and additional assignment restrictions. *Journal of Manufacturing Systems* 50, 180-192.
- [25] Jiménez F. (1990). La gerencia y los sistemas de producción. *Tecnología en marcha* 10(2), 25-29.
- [26] Carreño C. y Beltrán Y. (2016). Sistemas de producción en una sociedad globalizada. *Revista ingeniería, matemáticas y ciencias de la información* 4(7), 71-76.
- [27] Montejano S. et al. (2021). Relación de los sistemas de producción con la logística en Mipymes de Aguascalientes. *Revista iberoamericana de contaduría, economía y administración* 10(20).
- [28] Miño G. et al. (2015). Planeación de requerimientos de materiales por el sistema MRP. Caso Laboratorio Farmacéutico Oriente. Cuba. *Tecnología química* 35(2), 248-260.
- [29] Rivera J. et al. (2014). Diseño e implementación del sistema MRP en las pymes. *Industrial data* 17(2), 48-55.
- [30] Bustinza O. et al. (2013). Influencia de una cultura organizativa orientada hacia la calidad en los beneficios de la implantación de un sistema de gestión de recursos ERP. *Intangible Capital* 9(1), 126-152.

Modelación y automatización de los procesos de contratación y pago de proveedores a través de Business Process Management BPM

Claudia Yadira Rodríguez Ríos¹

María Camila Cárdenas Ruiz²

Katherine Andrea Muñoz Cely³

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

En este capítulo se plantea la automatización de los procesos críticos de contratación y pago de proveedores con el fin de plantear opciones para mejorar la operación de una empresa, a través del uso de tecnologías que permitan realizar de manera más eficiente los procesos. Se considera importante este aporte dado que puede servir de ejemplo para que más Pymes del sector de TI puedan utilizar los resultados y lograr automatizar otros procesos, porque en este trabajo se presenta un paso a paso para el desarrollo de la automatización y se presentan las lecciones aprendidas sobre el proceso realizado. La investigación se aplicó en una Pyme colombiana perteneciente al sector de TI. Se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas con el personal específico a cargo del proceso, determinando las fases, las actividades que involucra y los actores organizacionales y funcionales que intervienen. De igual forma, se realizó una búsqueda sistemática de trabajos relacionados con el tema, con el fin de obtener información pertinente. En el desarrollo de la investigación se observó la utilidad de la herramienta Bizagi Suite para crear la documentación de los procesos, la cual es más sencilla ya que se representa por medio de gráficos, soporta la notación BPMN2.0 y facilita la automatización de los procesos sin necesidad de programación por parte del desarrollador. Así mismo, se destaca la importancia del uso de tecnologías informáticas en las empresas ya que se logra proponer mejoras de las tareas y procesos, lo cual permite optimizar tiempo y recursos. Este estudio documenta detalladamente cada etapa y los pasos que se realizaron para el desarrollo de la automatización de dos procesos críticos en una empresa de TI, que pueden ser replicados por otras empresas en distintos procesos.

¹ Magíster en Ingeniería Industrial.

Contacto: claudia.rodriguez@escuelaing.edu.co

² Estudiante de Ingeniería Industrial.

Contacto: maria.cardenas-r@mail.escuelaing.edu.co

³ Estudiante de Ingeniería Industrial.

Contacto: katherine.munoz-c@mail.escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La relación con los proveedores es un factor importante para las empresas, pues son los encargados de suministrar los elementos necesarios para el desarrollo de las operaciones dentro de una compañía, por ende, es fundamental investigar a detalle la reputación con la que estos cuentan, al igual que la calidad de los servicios que presta, entre otras cosas. Esto con el fin de seleccionar los mejores candidatos para realizar un proceso merecedor de contratación, cumpliendo cada actor con sus obligaciones y generando así un excelente vínculo y una relación duradera entre ambas partes.

El objetivo de la presente investigación es modelar y diseñar un prototipo de la automatización de los procesos de contratación y pago de proveedores, para ello, se usan las herramientas de Business Process Management Suites BPMS para descubrir, y documentar en BPMN 2.0 usando Bizagi Modeler® para modelar el proceso, así se visualiza de manera más sencilla la relación que existe entre cada una de las actividades representadas como un flujo de trabajo; luego se usa Bizagi Studio® para hacer la respectiva automatización, que incluye actividades como el modelar los datos, definir las formas, definir las expresiones, definir las condiciones, validaciones, así como definir, los usuarios y participantes, definir la colaboración, y finalmente ejecutar el proceso.

Los procesos anteriormente mencionados corresponden a un tipo de proceso denominado *Procure to pay*, el cual comienza en el instante en el que una persona de la organización desea adquirir un producto o servicio, finalizando con la entrega o pago de dicho producto o servicio. Un proceso de compra y pago a proveedores cuenta con distintas actividades, tales como, realización de las cotizaciones, aprobación de las compras, selección de los proveedores, emisión de las órdenes de compra, recepción de las mercancías o consumo del servicio, cheques y pago de facturas [1].

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Business Process Management BPM

BPM es un sistema de gestión integrado basado en procesos que permite a las organizaciones mejorar la eficiencia, a través de métodos, herramientas, tecnologías y sistemas de información especializados enfocados tanto en procesos operativos como de negocio [2, 3]. De igual manera, se entiende como un enfoque centrado en la mejora del rendimiento que combina las TI con metodologías de procesos y gobierno [4, 5], es decir, tiene un enfoque holístico que permite definir las mejores prácticas para su desarrollo o el rediseño de los procesos, con el fin de brindar mayores utilidades a la empresa [6, 7].

La implementación de BPM dentro de una empresa, consiste en la ejecución de una secuencia de fases: la identificación del proceso, el descubrimiento de los procesos, el análisis, el rediseño, la automatización, y el monitoreo y control; éstas conforman el ciclo del proceso, el cual asegura un mejoramiento continuo. En la presente investigación se hizo uso de algunas de ellas: identificación, descubrimiento y automatización (prototipo), desglosando el desarrollo de cada una de estas mediante un paso a paso, con el fin de crear un marco guía para que las pymes del sector puedan replicar el trabajo realizado y usarlo para otros procesos.

2.2 Notación de BPMN 2.0

La Notación para el Modelamiento de Proceso de Negocio es un lenguaje que permite la creación de diagramas para modelar este tipo de procesos; es crucial dado que es una norma que contiene gran variedad de proveedores, pero que está enfocada bajo el objeto Management Group OMG. Adicionalmente, permite documentar que actores tanto internos como externos participan en el proceso, a su vez facilita la posibilidad de compartirlos entre los diferentes actores. Esta notación ha sido diseñada especialmente para coordinar la secuencia de los procesos y mensajes que fluyen entre participantes de actividades distintas, así mismo, se documentan los mensajes, las compuertas y los eventos asociados a las actividades [8, 9].

Para su desarrollo se realizan los siguientes pasos; comenzado con la identificación del inicio y fin del proceso; es decir su alcance, luego se determina que representa la instancia (para este proceso sería la

factura del proveedor), se definen los posibles finales, luego se realiza la enumeración de las respectivas actividades para crear el diagrama BPMN 2.0, por medio del uso de *lanes, pool*, compuertas, eventos, tareas, subprocesos, flujos de mensajes entre el proceso y los actores organizacionales (agentes externos a la organización) que permiten plasmar la ruta de este [10, 11].

2.3 Bizagi Suite

Para el desarrollo de esta investigación se hace uso de Bizagi, cuyo objetivo es transformar los procesos para realizarlos de una manera menos manual y más rápida; convirtiéndose en una de las herramientas TI más reconocida en el ámbito de automatización inteligente de procesos [12]. Bizagi es una suite ofimática compuesta por dos herramientas denominadas Bizagi Modeler y Bizagi Studio, la primera es un software que permite mapear los procesos de negocio, por medio de su creación y documentación, almacenados en un repositorio denominado computación en la nube, donde está ajustado para la notación BPMN2.0. Con el fin de obtener una mejor visión de cada actividad dentro del proceso y así poder identificar las oportunidades de mejora, incrementado la eficiencia de la empresa [13].

Por otro lado, Bizagi Studio es un software que permite a las áreas de negocio y de TI convertir cualquier proceso en aplicaciones empresariales, es decir, automatizaciones digitales, esto por medio de la creación de formularios a través de su sistema intuitivo denominado *wizard* [14], que permite diseñar la interfaz que tendrá la automatización, la cual se visualiza al ejecutar el programa, así como todos los pasos para lograr el prototipo.

2.4 Tecnologías de la información TI

La empresa en la que se trabaja es del sector de servicios de consultoría, que brinda soporte en la automatización de procesos de negocio, con el fin de innovar e impulsar la transformación digital de las empresas por medio del uso de TI, las cuales se relacionan con las redes, software, hardware, el internet y las personas que trabajan con estas tecnologías.

Ahora bien, en las empresas se tiene una nueva era de la información, donde cuentan con departamentos enfocados en TI para administrar sus equipos de cómputo, redes y diferentes áreas técnicas de sus negocios; es importante que las organizaciones se adapten y avancen al mismo ritmo de la tecnología y así garantizar la continuidad y eficiencia de las actividades de los procesos y de los negocios actualizándose en el almacenamiento, procesamiento y recuperación de datos, así como también proteger e intercambiar información necesaria entre las organizaciones [15, 16].

Es por esto por lo que dentro de la investigación se hace uso de Bizagi Suite, puesto que es una herramienta de tecnología de la información, la cual permite automatizar y modelar los procesos, tal como se mencionó anteriormente.

2.5 Proveedores

Los proveedores son uno de los elementos más importantes dentro de una organización, dado que son esenciales en la adquisición de un servicio o producto para el desarrollo de las operaciones de la empresa; por esto es importante medir la calidad y confiabilidad de estos frente a ciertos aspectos, tales como, el tiempo y cumplimiento de entrega, calidad de materias primas y flexibilidad.

Actualmente, se ve un interés por parte de las organizaciones en cuanto a la confianza que generan los proveedores, al brindar los suministros necesarios en el instante en el que la compañía los requiera, a un precio competitivo y una calidad deseada. Pues, si una empresa cuenta con proveedores confiables, será de ayuda para mejorar su productividad, de manera que la organización sea más rentable y exitosa en el mercado [17].

Dicho lo anterior, este proyecto busca presentar dos de los procesos en los cuales los proveedores juegan un papel importante debido a que son uno de los actores principales. Estos son los referentes a contratación

y pago de proveedores. En el primero se contrata al proveedor, luego de que se hace una selección de este de acuerdo con el producto o servicio solicitado y las cotizaciones económicas recibidas. El segundo proceso inicia con la cuenta de cobro efectuada por los proveedores, para la cual se debe realizar una validación por parte del área solicitante y la parte contable, en la cual, al cumplir todos los requisitos, se procede a pagar.

3. MÉTODO

La presente investigación es descriptiva, porque se aplica en un estudio de caso que permite hacer una descripción más minuciosa del problema sin profundizar en las razones de su situación actual [18, 19], además es una investigación cualitativa, ya que los datos derivados no son estadísticamente mensurables, deben ser interpretados subjetivamente y se usaron las entrevistas semiestructuradas para la recopilación de la información [20], también es una investigación aplicada debido a que crea nuevo conocimiento que mejora los procesos productivos de las empresas o la prestación de servicios con el fin de mejorar los procesos de las empresas y así mismo su productividad [21].

Ahora bien, el trabajo se realiza en dos etapas, la primera es la caracterización del proceso, a través de las entrevistas y validación los usuarios del modelo que se documenta en Bizagi Modeler, y en la segunda se realiza el prototipo de los procesos automatizados para contratación y pago a proveedores, para esto, se realizan las siguientes fases: importar el modelo documentado en Bizagi Modeler, definir el modelo de datos, las formas, reglas de negocio (expresiones), usuarios, interfaces de integración, y luego se puede ejecutar desde la web.

3.1 Recolección de información

La información necesaria para esta investigación se adquirió mediante entrevistas semiestructuradas aplicadas a cada miembro a cargo de los procesos seleccionados, donde se determina la información:

- Inicio y finalización del proceso
- Actividades que ejecutan
- Actores organizacionales y funcionales
- Recursos físicos y tecnológicos
- Eventos que se presentan en el proceso
- Decisiones

El documento base que se utilizó para realizar las entrevistas contiene 31 preguntas formuladas con el fin de obtener toda la información relevante, que sirva para comprender mejor el proceso y documentarlo de manera correcta. El formato de esta encuesta se presenta en el Anexo 1.

3.2 Modelación del proceso

Después de recolectar la información, se procede a plasmar en Bizagi Modeler mediante pools en los cuales se indicarán los actores organizacionales y el nombre del proceso y *lanes* para mencionar los actores funcionales, luego se determinan las fases que agrupan actividades para un mismo fin, así mismo, se incluyen, compuertas para las decisiones, tareas que pueden ser de usuario o automáticas, eventos de inicio y fin y flujos quedará documentado el proceso.

3.3 Desarrollo del prototipo

3.3.1 Creación de base de datos

Una vez se tenga la documentación de los procesos lista en Bizagi Modeler, se da paso a hacer uso del programa Bizagi Studio, plataforma la cual permitirá el desarrollo de la automatización de cada uno de los procesos, para ello se debe crear un nuevo proyecto, indicar el nombre y la ubicación dentro del computador, seleccionar la opción *advanced IIS configuration* y *next* en las siguientes ventanas.

Para el desarrollo de este paso, inicialmente se debe importar la documentación del proceso desde Bizagi Modeler, en el cual se tiene que escoger el archivo que contiene el respectivo modelado del proceso y asignarle un nombre; con este ya cargado, se ingresa en el menú denominado *model data* en el cual se creará la base de datos y se deberá proporcionar un nombre (el cual no podrá ser cambiado) referente a la entidad principal y de esta forma ir creando las demás entidades con la información requerida.

Es importante mencionar que la base de datos está compuesta por dos tipos de entidades, las cuales son: las entidades paramétricas y las entidades maestras, la primera será representada por medio de atributos, siempre y cuando sean considerados como parámetros, es decir aspectos fijos, los cuales no se cambien, como por ejemplo las áreas de la empresa; mientras que la segunda es decir, entidades maestras se permite guardar toda la información del caso que representa todos aquellos atributos que se pueden modificar según se requiera, como ejemplo, el nombre de un proveedor.

Al ingresar al menú *model data*, automáticamente aparecerá una entidad maestra en la cual se deben definir los diferentes atributos, dando clic derecho sobre esta y seleccionando la opción *edit attributes*, allí se deberá añadir cada atributo especificando su nombre y el tipo. Estos pueden ser: *Boolean (yes/no)*, *currency (\$)*, *data-time* (fechas), *file* (archivos), *image*, *integer* (número enteros), *string* (texto) y entidades (*master*, paramétrica, *stakeholder*, *system*).

Finalmente, para completar el modelo de datos independientemente de la entidad, ya sea de tipo paramétrica o maestra, sus atributos o algunos de ellos están relacionados con otros atributos de otras entidades; esta relación indica de uno a uno, o una relación de uno a muchos, o de muchos a muchos, generalmente hace referencia en un solo sentido, es decir, de uno a muchos, como ejemplo un mismo proveedor puede tener varias órdenes de compra de insumos; esto se indica a través de una relación que se dibuja con una línea con una flecha, donde la salida de línea indica uno, en la relación y la flecha indica muchos [22].

3.3.2 Creación de formas

Como segundo paso se deben crear las formas las cuales son las pantallas que tendrán cada actividad de la automatización, para esto debe dirigirse al menú *define forms* y seleccionar la actividad en la cual desea realizar el boceto, en este debe añadir los atributos vinculados en la base de datos que sean necesarios para el desarrollo de esta actividad y además de esto puede incluir títulos, colores, imágenes y demás aspectos estéticos que guste.

Una vez se encuentre dentro del menú *define forms* puede observar en la parte izquierda tres menús los cuales corresponden a: *data*, *controls* y *layout*, en *data* se observan toda la información incluida en la base de datos, en *controls* se encuentran todas opciones de diseño, tales como texto, imágenes y demás; y en *layout* se encuentra todo lo referente a divisiones de la página.

3.3.3 Creación de expresiones

Para el desarrollo de este paso, primero se debe dirigir al menú *business rules* y escoger la opción *define expressions*, una vez se encuentre allí podrá observar que los caminos de las compuertas estarán resaltados en amarillo, aquí es donde deberá crear las expresiones que son las que definen el rumbo de la actividad del proceso. Para esto debe seleccionar la opción *based on the result of an expression*, una vez allí deberá insertar en el campo todas las condiciones que necesita; para ello debe arrastrar desde *data model* el atributo que requiere e insertar el operador junto con el valor. Posteriormente, para el otro camino de la compuerta debe seleccionarlo y escoger la opción *else (when no other option is valid)* para que el software identifique los dos posibles caminos que puede coger dependiente de la acción que se vaya a realizar.

3.3.4 Definir condiciones

Como cuarto paso, se deben definir las condiciones en caso de que sea requerido, para esto, se debe dirigir al menú *business rules* y escoger la opción *Activity Actions*, dentro de esta podrá establecer la condición

para las actividades que necesite, para ello deberá crear una regla de negocio que indique el inicio de la actividad, seleccionando la actividad correspondiente para abrir la pestaña del administrador de expresiones, en el cual debe escoger el atributo al que se le valida el cumplimiento de la condición, la cual puede si se requiere expresar como una fórmula [23].

3.3.5 Definir validaciones

Para definir las validaciones debe inicialmente crear la expresión sobre la actividad requerida, luego de esto abre dicha expresión y se dirige a la opción *data model*, en la cual debe agregar el atributo al cual se le va a realizar la validación, posterior a esto debe ingresar a la opción *function*, donde podrá escoger de una lista de funciones la que más se ajuste a sus necesidades, una vez escogida debe guardar el elemento expresión dando clic en Ok, por ejemplo, se puede validar que la fecha de solicitud no sea menor ni mayor a la fecha del día en que se genera dicha solicitud, en general se puede validar el contenido del valor de las variables, para ir controlando el proceso [24].

3.3.6 Definir usuarios y participantes

En este paso se busca asignar un usuario para que desarrolle las actividades del proceso; es importante mencionar que solo los usuarios que se hayan asignado podrán ejecutar la actividad especificada, para ello, se debe dirigir al menú *performers* donde podrá visualizar la actividad en la que es posible asignar un usuario, allí debe seleccionar dicha actividad en la cual aparecerá una ventana de asignación de participantes, donde podrá agregar las condiciones según la propiedad que desee (ubicación, área, ID, etc.) así al igual que las expresiones puede colocar las condiciones para que los usuarios accedan a la ejecución de cada una de las actividades, para guardar estos cambios debe dar Ok [25].

3.3.7 Definir colaboración

Por último, es posible generar plantillas de documentos en Word, Excel o en formato PDF, para esto, se debe crear la plantilla con el diseño, estructura y formato que se desee, referenciando la información que necesita, tal cual aparece en la base de datos. A su vez, dentro de las entidades en el modelo de datos, tiene que existir un atributo de tipo *file*; una vez hecho esto se podrá dirigir al menú *forms* y agregar un *control* de *document templates*, posteriormente deberá pararse sobre él para identificar el menú *Basic* y dirigirse a la opción *Data Source*, en la que tiene que vincular el atributo con la base de datos [26], ya con esto queda listo para ser llamado en el proceso de diseño de formas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se presenta el desarrollo de la documentación y automatización de los procesos de contratación y pago a proveedores; lograda a partir de las entrevistas semiestructuradas con todos los involucrados en el proceso, adicionalmente una vez se tuvo la documentación en BPMN2.0 se procedió a validar con la gerencia y con los dueños de los procesos para verificar que estaba correcta, luego de este paso se procedió a realizar la automatización de cada proceso. Es importante destacar que la base de datos utilizada es la misma para ambos procesos, así mismo, con respecto a los pasos de condiciones, validaciones, usuarios y participantes, no se realizaron, dado que no fueron acordados con la empresa en el alcance del proyecto.

4.1 Proceso de contratación de proveedores

4.1.1 Documentación

En el proceso de contratación de proveedores intervienen dos actores organizacionales, uno es la empresa con el proceso de contratación y el otro es el proveedor; 5 actores funcionales los cuales son: el solicitante del servicio, el jefe inmediato del solicitante, el director financiero, el gerente jurídico y el departamento administrativo y contable, así mismo, cuenta con tres fases: la solicitud del bien, la evaluación de la solicitud y la generación del contrato.

En las tres fases se contemplan, las actividades que implican la solicitud del bien, a cargo de las diferentes áreas de la empresa, y termina en recibir las propuestas de los proveedores y coordinar la suficiencia de propuestas por parte de los proveedores, en la segunda fase, se incluyen todas las actividades hasta lograr coordinar los bienes que se desean adquirir y con qué proveedor, en la tercera fase se oficializa con el contrato la compra como tal. El proceso inicia con la solicitud por parte de un miembro de la empresa, el cual necesita adquirir un producto o servicio, el solicitante debe presentar una propuesta económica en la que se describa el servicio o producto a adquirir indicando la fecha de inicio, fecha de finalización y el costo de este (en caso de que el solicitante no cuente con esta, se gestiona el proceso de consecución de proveedores).

La propuesta pasa a revisión a cargo del jefe inmediato del solicitante, el cual podrá aprobarla, rechazarla o subsanarla, en caso de que solicite cambios (subsanción) se devuelve al solicitante para que realice las respectivas correcciones, si, por otro lado, se rechaza, finaliza el proceso de contratación de proveedores o si decide aprobarla, pasa a cabeza del director financiero, quien realiza el mismo procedimiento que el jefe inmediato, cuando este la aprueba, el gerente jurídico revisa condiciones de fondo, es decir, si es necesario información adicional.

En caso de que sí, se informa al solicitante y se devuelve para que adjunte la nueva información, de no ser necesario, el gerente jurídico informa al departamento administrativo sobre una nueva contratación, especificando si es una orden de compra o prestación de servicio. Finalmente, dicho departamento realiza el trámite correspondiente, para así archivar el contrato, actividad con la cual finaliza el proceso, dicho proceso se presenta en la Figura 1.

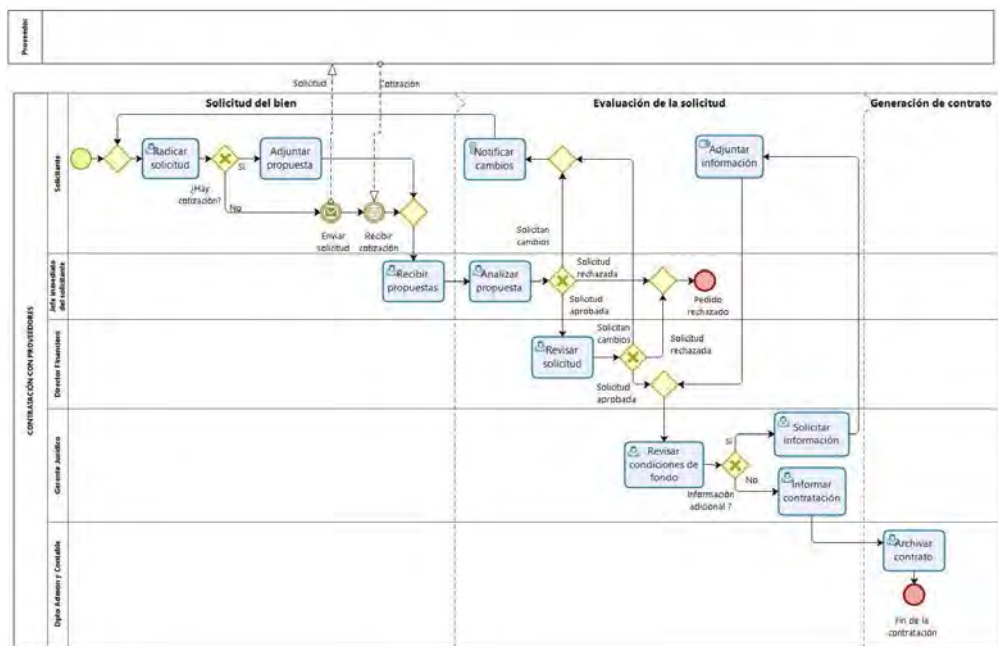


Figura 1. Documentación contratación de proveedores

4.1.2 Creación de base de datos

Como se mencionó anteriormente, para los procesos de contratación y pago a proveedores se utilizará la misma base de datos, la cual tiene como entidad principal una entidad de tipo maestra denominada *Contratación del Proveedor*, y sus atributos como se observa en la Figura 2.

4.1.3 Creación de formas

En este paso se desarrollaron las formas correspondientes a la radicación de solicitud, adjuntar la propuesta económica, análisis de la propuesta por parte del jefe inmediato del solicitante y del director financiero, revisión de condiciones de fondo, solicitud de información adicional y nueva contratación; en todos los campos de las formas donde se captura información, o dónde se guarda, o se consulta información, esta se

vincula con algún campo de la base de datos, y para el diseño de las interfaces se utilizan *labels*, *layouts*, *containers* y *document templates*. En la Figura 3 se observa una de las formas diseñadas para este proceso.

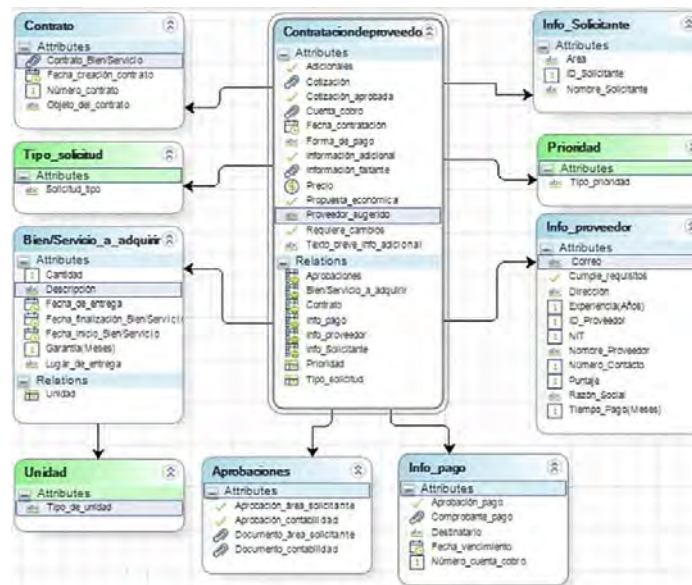


Figura 2. Base de datos contratación de proveedores

Figura 3. Forma Radicación de solicitud

En el título de la forma se utiliza un *layout* 70%-30%, el cual permite dividir la pantalla en dichos porcentajes para distribuir el nombre de la actividad que se llevará a cabo en dicha forma, en este caso es *RADICACIÓN DE SOLICITUD*, esta corresponde a la división del lado izquierdo, mientras que en el lado derecho se podrá colocar el nombre de la empresa, esto se hará mediante el uso de los *label*. Cuando se cuente con esto, se podrá seguir con el resto de la forma, en la cual se añade un *group*, denominado Radicación de solicitud de contratación de proveedor o Contratista, con el cual tendrá la opción de desplegar o contraer la información.

Posterior a esto se divide nuevamente la pantalla mediante un *layout* 50%-50%, seguidamente se agregan cada uno de los atributos que se requieren para llevar a cabo esta actividad, los cuales fueron descritos anteriormente en la base de datos, esto se hace mediante el menú *data*, en la que se observan toda la información incluida en la base de datos y simplemente se arrastra el atributo que desee hasta la ubicación de pantalla que guste, cabe resaltar que el nombre del recuadro será correspondiente al utilizado en la base de datos, por lo cual deberá cambiarlo de forma manual dando doble clic sobre este. El diseño de esta forma fue creado a gusto personal, sin embargo, existen muchas más herramientas que podrá usar según su criterio y necesidades.

4.1.4 Definir expresiones

Debido a que las expresiones se realizan en la parte en la que hay que tomar decisiones en el proceso, se observa que, para el caso de contratación de proveedores, se deberán definir si existe o no una cotización, para esto el sistema evalúa los datos y determina si hay o no cotización, si hay debe adjuntarla sino debe solicitarse. De igual forma, esto se realiza para las demás decisiones que se deben tomar durante el proceso. En la Figura 4 se observa más a detalle cómo se definen estas expresiones.

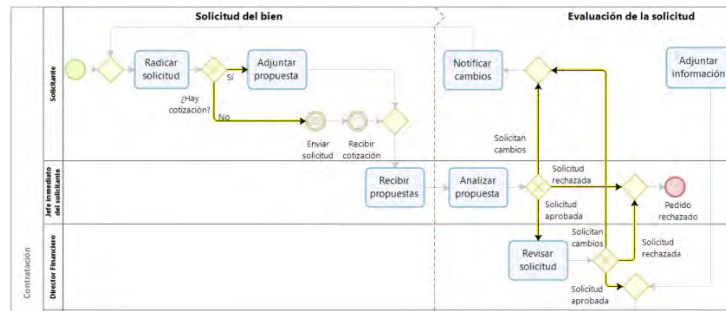


Figura 4. Expresiones contratación de proveedores

Se trabajó en el menú *define expressions* en el cual se selecciona inicialmente el camino señalado *Sí*, una vez ahí, se elige la casilla *Based on the result of an expression*, donde se debe arrastrar el atributo *Propuesta_económica* al primer espacio, posterior a esto, se elige la condición, que para este caso es *Is Equal to*, para finalmente compararlo con el valor *true*, tal como se muestra en la Figura 5. Una vez se haya validado el camino *Sí*, se selecciona el referente a *No*, para terminar de construir el camino que deberá llevar la automatización, seleccionando la opción *Else (When no other option is valid)*.

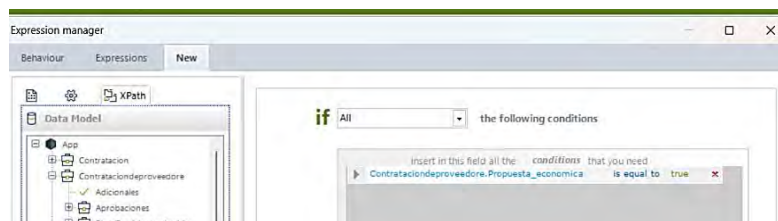


Figura 5. Validación expresiones contratación de proveedores

4.1.5 Definir colaboración

Para el proceso de contratación a proveedores se desarrolló un formato de Word, el prototipo generara automáticamente un contrato con la información pertinente, para esto se añadió en la forma de la actividad *Archivar Contrato* un *Document Template*, el cual tenía relación con el atributo *Contrato_Bien/Servicio*. Una vez hecho esto, se procede a ir a la opción *Configuration Wizard*, donde se debe adjuntar el prototipo de contrato elaborado inicialmente en formato Word en la casilla *Template*, como se muestra en la Figura 6.

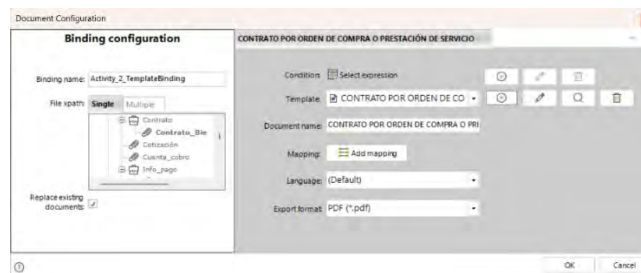


Figura 6. Configuración de colaboración contratación de proveedores

Posteriormente, debe dirigirse a la opción *Mapping* y relacionar mediante flechas los atributos de la base de datos con los datos del documento, este proceso lo puede evidenciar en la Figura 7.

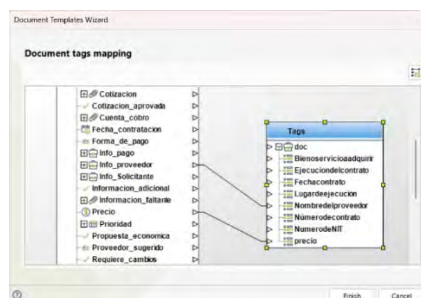


Figura 7. Mapeo contratación de proveedores

4.1.6 Automatización

Después de realizar todos los pasos anteriormente mencionados, se procede a ejecutar el programa, el cual nos mostrará la visualización de la automatización final, en la Figura 8 hace referencia al inicio del proceso, en el cual se desarrolla la radicación de la solicitud de la adquisición de un bien o servicio, en esta se ingresa toda la información necesaria para poder crear dicha petición y de esta manera dar inicio al proceso.

Figura 8. Radicación de solicitud

En la Figura 9 se evidencia la forma que permite identificar si el solicitante cuenta o no con una propuesta económica. En caso de que si, el prototipo de la automatización permite adjuntar dicha cotización como se muestra en Figura 10.

Figura 9. Adjuntar propuesta económica

Figura 10. Adjuntar cotización

Continuando con el proceso, en la Figura 11 se hace un análisis de la propuesta con base en los criterios de evaluación; dicho análisis es realizado por el jefe inmediato del solicitante y el director financiero, donde se le da un puntaje de 1 a 100 indicando la factibilidad que tiene el proveedor para ser contratado y posteriormente aprobar o no la cotización.

Figura 11. Análisis de propuesta o cotización

Una vez se aprueba la cotización por parte de los dos agentes funcionales mencionados anteriormente, se procede a revisar las condiciones de fondo, determinando si se necesita información sobre el proveedor o

el servicio/producto, mencionando así cual es la información faltante que se requiere, esto va a depender de la gerente jurídica, la cual decidirá si aprueba o no la cotización, como se evidencia en la Figura 12.

REVISAR CONDICIONES DE FONDO

Requiere información adicional: Sí No

Texto breve de información adicional:

Cotización aprobada: Sí No

Figura 12. Revisar condiciones de fondo

En caso de que no lo apruebe y de que si requiera información adicional el proceso continuará en la Figura 13, de no ser así podrá seguir con el paso presentado en la Figura 14.

SOLICITUD DE INFORMACIÓN ADICIONAL

Adjuntar información adicional

Información faltante: No hay archivos

Figura 13. Solicitud de información adicional

Como se mencionó anteriormente, en caso de requerir información adicional, se procede a adjuntarla mediante la forma presentada en la Figura 13. Por último, para realizar la nueva contratación con el proveedor y de esta forma finalizar el proceso, se procede a diligenciar los datos necesarios para generar el contrato que se hará de manera automática con la información descrita, gracias a las formas realizadas en este proceso, tal como se muestra en la Figura 14.

NUEVA CONTRATACIÓN

Información de nueva contratación

Número de contrato: 1248

Fecha creación de contrato: 02/12/2021

Número de NIT: 1248897

Bien o servicio a adquirir: Papelería

Ejecución del contrato: Resmas tamaño carta y oficio

Nombre del proveedor: PANAMERICANA

Precio: €800.000,00

Lugar de ejecución: BOGOTÁ D.C.

Generación contrato

Generar documentos

Contrato bien o servicio: CONTRATO POR ORDEN DE COMPRA O PRESTACIÓN DE SERVICIO.pdf

Figura 14. Nueva contratación

4.2 Proceso pago a proveedores

4.2.1 Documentación

Este proceso es complementario del anteriormente analizado, en el proceso de pago a proveedores intervienen tres actores funcionales, que son: el analista contable, las áreas solicitantes y el director general, y al igual que en el proceso anterior el proveedor y la empresa aparecen como actores organizacionales, además, se compone de tres fases correspondientes a la aprobación de factura, revisión y pago. En estas fases se contemplan las actividades que implica la aprobación de la factura, a cargo de las áreas de contabilidad y la solicitante, que termina cuando se aprueba la solicitud, en la segunda fase, se incluyen las actividades correspondientes a la revisión necesaria que se le debe hacer a la factura, mientras que en la tercera fase se realiza la preparación y realización del respectivo pago.

Este proceso inicia con la recepción de una factura o cuenta de cobro emitida por parte del proveedor al analista contable, este solicita por correo la aprobación de dicho documento al área solicitante del producto o servicio, quien revisa la factura y evalúa que todo este correcto, en caso de que no, se notifica al proveedor mediante una carta, finalizando así el proceso; por el contrario, si todo está en orden, el área encargada aprueba la solicitud para enviarla nuevamente al analista contable, quien tendrá que hacer una segunda

revisión para verificar que todo lo relacionado a soportes y requisitos legales se encuentre correcto, en caso de que no sea así, se notifica por medio de una carta y se devuelve al proveedor para que gestione las correcciones y vuelva a enviar la cuenta de cobro, por otro lado, si cumple todos los requisitos se procede a registrar la transacción para posteriormente archivarla.

Debido a que los pagos se realizan los jueves, se debe esperar hasta este día para actualizar la información en el sistema ERP y continuar con la preparación del pago. Una vez realizado esto, el director general debe dar su aprobación para poder realizarlo, y de esta forma finalizar el proceso, si llega a rechazarlo, se devuelve al analista contable para preparar el pago nuevamente. En la Figura 15 se muestra el proceso documentado en Bizagi Modeler.

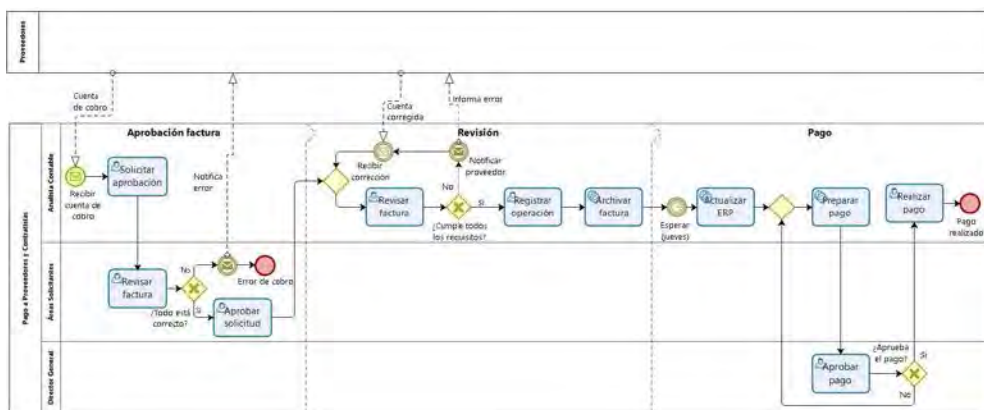


Figura 15. Documentación pago a proveedores

4.2.2 Creación de base de datos

Como se mencionó antes, la base de datos correspondiente a dicho proceso se encuentra en la Figura 2, dado que se utilizó la misma que en el proceso anterior.

4.2.3 Creación de formas

Para el proceso de pago a proveedores se diseñaron las formas correspondientes a la información inicial del pago al proveedor, aprobación del área solicitante, aprobación del área contable, información de la cuenta de cobro e información del pago, al igual que el proceso anterior se hace uso de las mismas herramientas. En la Figura 16 se observa una de las formas diseñadas para este proceso.

Figura 16. Forma Información inicial del pago al proveedor

Como se puede observar en la Figura 16, se utilizó un *layout* 70%-30%, el cual permite dividir la pantalla en dichos porcentajes para distribuir la información deseada, la cual será el nombre de la actividad que se llevará a cabo en dicha forma, referente a *Pago a proveedores y contratistas*; esta corresponde a la división del lado izquierdo, y se realizará mediante un *label* que se encuentra en el menú *controls*, por otra parte en el lado derecho se podrá colocar el nombre de la empresa en la cual realizará el proyecto o un *label* con otra información. Cuando ya se cuente con esto, se podrá seguir con el resto de la forma, en la cual se divide nuevamente la pantalla mediante un *layout* 50%-50% y se añaden dos *groups*, referentes a la *Información del proveedor o contratista* e *Información del bien o servicio*, con los cuales tendrá la opción de desplegar o contraer la información.

Luego se agregan cada uno de los atributos que se requieren para llevar a cabo esta actividad, estos se describieron anteriormente en la base de datos, para lograrlo debe dirigirse al menú *data*, donde se observa toda la información incluida en la base de datos y solo deberá arrastrar el atributo que requiera hasta la ubicación de pantalla que desee, es importante mencionar que el nombre del recuadro será correspondiente al utilizado en la base de datos, por lo cual deberá cambiarlo de forma manual dando doble clic sobre este.

4.2.4 Definir expresiones

Para este caso se debe definir si todo lo presentado en la factura de cobro está correcto, con base a esto, se escogerá la opción afirmativa y se incluirán los atributos correspondientes, de igual manera se desarrollará el mismo proceso para el otro posible camino que puede tomar, determinando de esta forma si tiene que notificar al proveedor o aprobar la solicitud. Esto se realiza con las demás decisiones que se presenten en el proceso. En la Figura 17 se observan los caminos que deben ser definidos.

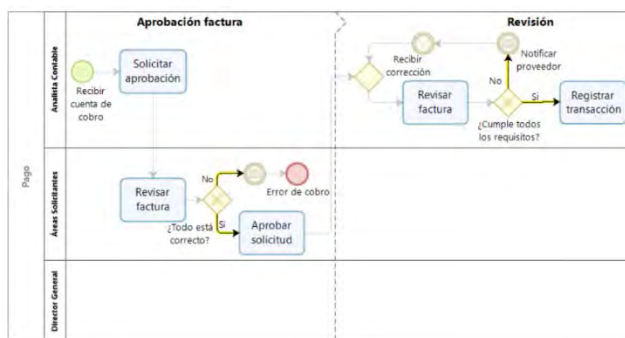


Figura 17. Expresiones pago a proveedores

Para esto se trabajó en el menú *define expressions* en el cual se selecciona inicialmente el camino señalado *Sí*, una vez ahí, se elige la casilla *Based on the result of an expression*, donde aparece el menú para definir el valor verdadero de la función, allí se arrastra el atributo *Aprobación_area_solicitante* al primer espacio, posterior a esto, se elige la condición, que para este caso es *Is Equal to*, para finalmente compararlo con el valor *true*, tal como se muestra en la Figura 18. Una vez se haya validado el camino *Sí*, se selecciona el referente a *No*, para terminar de construir el camino que deberá llevar la automatización, seleccionando la opción *Else (When no other option is valid)*.



Figura 18. Validación expresiones pago a proveedores

4.2.5 Definir colaboración

Para el proceso de pago a proveedores se desarrollaron dos formatos de Word, para que de esta forma el prototipo generara automáticamente las cartas correspondientes de rechazo por parte del área del solicitante y el rechazo del área contable, si era necesario; para esto se añadieron los *Document Template* en las actividades de realizar factura de cada actor.

Para este caso, se mostrará el proceso para el área solicitante, por lo cual el *Document Template* tiene relación con el atributo *Rechazo_área_solicitante*, una vez hecho esto se procede a ir a la opción *Configuration Wizard*, donde se debe adjuntar el modelo de la carta elaborado inicialmente en formato Word en la casilla *Template*, como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Configuración de colaboración pago a proveedores

Posteriormente, se usa la opción de *Mapping* y se relaciona mediante flechas los atributos de la base de datos con los datos del documento, este proceso lo puede evidenciar en la Figura 20.

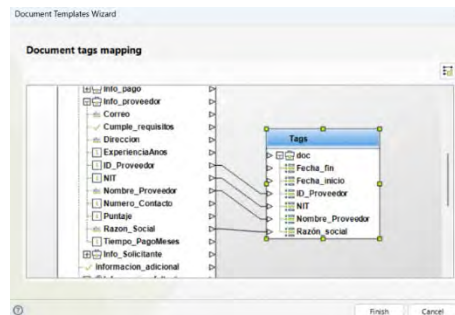


Figura 20. Mapeo contratación de proveedores

4.2.6 Automatización

Por último, se procede a correr el programa, con el fin de poder visualizar el resultado final de la automatización, tal como se muestra en las siguientes imágenes. Como se evidencia en la Figura 21, se debe diligenciar la información referente al proveedor y al bien o servicio adquirido, donde se deberá adjuntar la cuenta de cobro emitida por el proveedor, la cual dará inicio al proceso.



Figura 21. Información inicial del pago al proveedor

Una vez se adjunte la cuenta de cobro, está junto con la información diligenciada anteriormente deberá ser aprobada por parte del área del solicitante, como se evidencia en la Figura 22.



Figura 22. Aprobación área solicitante

En caso de ser aprobada podrá seguir con el proceso, en caso contrario, el sistema creará una carta de rechazo que podrá enviarse desde la misma pestaña, como se evidencia en la Figura 23.

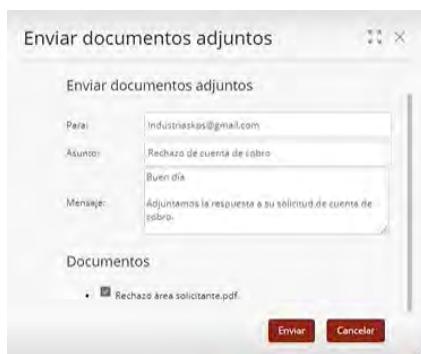


Figura 23. Correo rechazo área solicitante

De igual forma en la Figura 24, la cuenta de cobro deberá ser aprobada por el área contable donde se verificarán aspectos legales y contables.



Figura 24. Aprobación área contable

Si se aprueba el proceso continuará en la Figura 25, de lo contrario sucederá lo mismo que en el caso anterior, donde se genera una carta de rechazo. En la Figura 25 se evidencia un seguimiento relevante a la cuenta de cobro, con el fin de tener un control sobre las fechas en las que deben realizar los pagos, con respecto al vencimiento de las facturas.



Figura 25. Información cuenta de cobro

Por último, la Figura 26 hace referencia a la aprobación del pago por parte del director general, donde también se almacenará el comprobante después de realizarlo; para de esta forma finalizar el proceso.

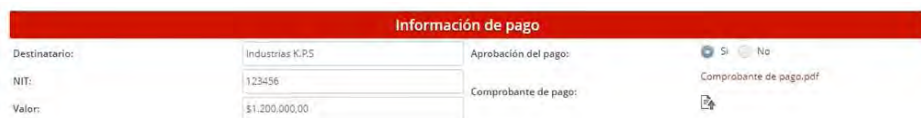


Figura 26. Información de pago

5. CONCLUSIONES

Las herramientas de BPM y la notación BPMN 2.0 sirven para desarrollar una modelación de los procesos de una manera sencilla, permitiendo que cualquier persona con o sin experiencia pueda crear y controlar la documentación, dado que, gracias a que se representa por medio de gráficos, se hace más comprensible para las organizaciones y sus colaboradores, así mismo, se evitan discrepancias en la interpretación, generando menos errores en el proceso y convirtiéndolo cada vez más predecible y estandarizado, donde se puede tener una medida de cómo se va desarrollando.

El enfoque BPM permite a las organizaciones identificar la existencia de actividades sin valor agregado, que generan varios de los desperdicios, como lo son el tiempo de espera y el sobre procesamiento, donde el

primero hace referencia a los tiempos perdidos o muertos que se generan dentro de una secuencia de trabajo y el segundo va dirigido a las actividades que no aportan valor adicional. Con base en esto, la herramienta BPM también permite corregir dichos desperdicios, de manera que permite el mejoramiento y crecimiento continuo de las organizaciones que lo implementan.

Al realizar la documentación de los procesos de contratación y pago a proveedores se observó que ambos eran muy mecanizados y gracias a la implementación de tecnologías informáticas, se logra inferir en que existe una forma de realizar dichos procedimientos de manera más eficiente, optimizando la espera de las aprobaciones dentro de los procesos y automatizando para este caso, la generación del contrato con los proveedores y así mismo las cartas de rechazo, si lo amerita la situación, con tan solo tener la información inicial en la base de datos; ahorrando de esta forma tiempo y recursos.

Una mejora importante que se da con esta automatización es en la parte de los pagos a los proveedores, ya que se disminuye ostensiblemente los tiempos de aprobación, ya que es solo marcar en el sistema aprobado y ya pasa a la siguiente instancia, sin esperar cartas o correos de aprobación de un directivo o del área solicitante, sino que automáticamente se informa que está aprobado, esto agiliza los tiempos de espera que habían antes, y disminuye las posibilidades de error involuntario al olvidar alguna cuenta.

Este proyecto de investigación pretende ser una guía para las empresas, animando a la gerencia a involucrar tecnología de TI en sus procesos, la idea es presentar un paso a paso que permita replicar esta automatización en otros procesos, y que sea un ejemplo fácil de seguir para mejorar la operación del día a día de los procesos más comunes en las organizaciones, tal como lo son la contratación y el pago de proveedores.

Por último, se recomienda que las empresas de diferentes sectores comiencen a utilizar este tipo de herramientas para documentar sus procesos, y de esta forma evidenciar de manera más clara en donde se pueden realizar cambios que permitan un mejoramiento continuo del proceso, haciéndolo más ágil. Es por esto, que el fin de esta investigación es ser un pilar para las demás organizaciones en este aspecto, mostrando detalladamente el desarrollo de cada etapa.

REFERENCIAS

- [1] Dumas M. et al. (2013). Introduction to Business Process Management. Spring.
- [2] Rodríguez C. (2015). Qué es Business Process Management (BPM). Definiciones y conceptos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito 25, 23-29.
- [3] Rodríguez C. et al. (2020). Desarrollo y aplicación de un instrumento para medir el grado de madurez de los valores Customer Orientation, Excellence, Responsibility, Teamwork CERT en las organizaciones. En Serna E. (ed.), Desarrollo e innovación en Ingeniería (pp. 463-471). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- [4] Rodríguez C. et al. (2017). Diseño de un modelo para la Gestión del Conocimiento con Enfoque BPM. Angew. Chemie Int. 336-343.
- [5] Rodríguez C. et al. (2021). Cultura BPM desde la perspectiva de eficiencia y eficacia. Parte 3. En Serna E. (ed.), Desarrollo e innovación en Ingeniería (pp. 320-335). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- [6] Gutiérrez A. et al. (2018). Factores críticos de éxito para la implementación de Business Process Management (BPM): Estudio de caso para la cadena de suministro de una empresa del sector floricultor. Revista Escuela de Administración de Negocios 1, 85-108.
- [7] Rodríguez C. et al. (2021). Application of the CERT Values Measurement Model for Organizational Culture in the Management and Quality Company. International Publishing, 399-408.
- [8] González J. y Parga M. (2014). Propuesta de diseño de un centro de distribución para los talleres de confección del macro modelo de negocios inclusivos del sector Bolonia-Usme. Pontificia Universidad Javeriana.
- [9] Rodríguez C. y Modragón A. (2019). Aplicación del ciclo de vida BPM en el proceso de postcosecha en una empresa del sector floricultor. En Serna E. (ed.), Desarrollo e innovación en Ingeniería (pp. 450-457). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- [10] Silver B. (2011). BPMN Method & Style with BPMN Implementer's Guide 2. Cody-Cassidy Press.
- [11] Rodríguez C. et al. (2021). Application of the BPM Life Cycle in the Post-harvest Process in a Company in the Floricultural Sector. En International Congress of Industrial Engineering. Bucaramanga, Colombia.
- [12] Bizagi Company. (2022). Historia Bizagi, Equipo de trabajo. Recuperado: <https://acortar.link/4pGABh>
- [13] Bizagi Company. (2022). Bizagi, Bizagi Modeler. Recuperado: <https://acortar.link/xFktw6>

- [14] Bizagi Company. (2022). Bizagi Studio. Recuperado: <https://acortar.link/2MOxiM>
- [15] López Ó. y Vaca Y. (2021). Exploración del sector TI y Defensa para la identificación de estrategias. Trabajo de grado. Fundación Universitaria Compensar.
- [16] Belloch C. (2012). Las Tecnologías de la Información y Comunicación en el aprendizaje. Press.
- [17] Tabares N. (2020). AHP difuso para la selección de un proveedor 3PL considerando el riesgo operacional. Revista EIA 17(33), 1-17.
- [18] Rodríguez C. y Roa J. (2022). Model to measure the effect of the integration of information in business processes. *Ortend* 28(1), 81-112.
- [19] Robert Y. (2003). *Case Study Research Design and Methods*. Sage.
- [20] Binda N. y Balbastre F. (2013). Investigación cuantitativa e investigación cualitativa: Buscando las ventajas de las diferentes metodologías de investigación. *Revista Ciencias Económicas* 31(2), 179-187.
- [21] Vargas Z. (2009). La investigación aplicada: Una forma de conocer las realidades con evidencia científica. *Revista Educación* 33(1), 155-165.
- [22] Bizagi Company. (2022). Relaciones Bizagi. Recuperado: <https://acortar.link/0a9Vxc>
- [23] Bizagi Company. (2022). Condiciones Bizagi. Recuperado: <https://acortar.link/Pvpp62>
- [24] Bizagi Company. (2022). Validaciones Bizagi. Recuperado: <https://acortar.link/uM5yap>
- [25] Bizagi Company (2022). Performers Bizagi. Recuperado: <https://acortar.link/WTHiFV>
- [26] Bizagi Company. (2022). Colaboración Bizagi. Recuperado: <https://acortar.link/WTHiFV>

ANEXO 1. Preguntas de la entrevista semiestructurada

1. ¿Qué hace usted?
2. ¿De qué actividades se compone el proceso?
3. ¿Cómo se inicia el proceso?
4. ¿Cómo finaliza el proceso?
5. ¿Hay varios finales en el proceso?
6. ¿Qué decisiones debe tomar a lo largo del proceso?
7. ¿Existen actividades que varíen o pasos adicionales al realizar el proceso? (*caminos condicionales, excepciones*).
8. ¿Con qué personas de la empresa tiene interacción para el desarrollo de sus actividades? (*actores funcionales*)
9. ¿Con qué personas externas a la empresa tiene contacto para el desarrollo de sus actividades? (*actores organizacionales*)
10. ¿Cuáles son recursos físicos y tecnológicos que utiliza para sus labores? (*Seleccionar una o más opciones*)
11. Documentos digitales
12. Documentos físicos
13. Computador/Celular/Tablet
14. Programas o aplicaciones (En caso afirmativo, que programas o aplicaciones: Excel, Word, Email, entre otros)
15. Sistemas de información o bases de datos
16. Máquinas
17. Herramientas
18. Otros (Especificar: _____)
19. ¿Cuál es resultado (productos o servicios) de sus actividades?
20. ¿Cuál es el entregable de sus actividades?
21. ¿Con que frecuencia presenta entregables?
22. ¿Se hacen reuniones para revisar lecciones aprendidas del trabajo realizado en la semana? ¿Con qué frecuencia?
23. ¿Existen productos o resultados secundarios? ¿Los usa alguien más? ¿Hay desperdicios o basura?
24. ¿Existe alguna actividad en la que considera que podría reforzar sus conocimientos? ¿Dónde siente que podría capacitarse?
25. ¿Existen indicadores o métricas que permitan saber el desempeño de los procesos? (En caso afirmativo, especificar que métricas o referencias usa para saber el estado actual de sus labores.)
26. ¿Cómo sabe que hizo bien el trabajo?
27. ¿Qué factores pueden causar demoras o retrasos para el desempeño de sus actividades?
28. ¿Qué información es crucial para el desarrollo de sus actividades?
29. ¿Depende de algún colaborador o área para desarrollar sus actividades? (*En caso afirmativo, ¿Qué información o recurso necesita de los otros?*)
30. ¿Envía o entrega información a algún colaborador o área? (En caso afirmativo, ¿Qué información o recursos entrega a los otros?)
31. ¿De qué forma se comunica con otros colaboradores para el desarrollo de sus actividades? (Ej.: WhatsApp, correo, actas, documentos, informes, Excel, nombre de estos archivos, y un ejemplo de los documentos.)
32. ¿Dónde se encuentra la información que necesita para el desarrollo de sus labores? (*Documentos, bases de datos, sistemas de información*)
33. ¿Cómo se fomenta el compartir y difusión de conocimiento entre colaboradores?
34. ¿Qué problemas surgen en el compartir del conocimiento?
35. ¿Cómo fue entrenado para desempeñar sus labores?
36. ¿Existen ayudas que faciliten el entendimiento de sus labores y actividades? (*Por ejemplo: herramientas, recursos o documentos*).
37. ¿El conocimiento que usted posee se encuentra disponible en algún sistema o documento? ¿La empresa está abierta a la generación de nuevas de ideas de mejora sobre las actividades que realiza?
38. ¿Tiene alguna dificultad, obstáculo o problema para desarrollar sus actividades?

Incremento de la eficiencia del proceso de logística de distribución secundaria mediante la implementación de una plataforma de *cross docking*

Ingleberto Enrique Castellanos-Pestana¹

Miguel Ángel González-Curbelo²

Universidad EAN
Colombia

La implementación de una plataforma de *cross docking* puede ayudar a simplificar y agilizar la cadena de suministro, al tiempo que reduce los costos de transporte mediante la mejora de rutas. *Cross docking* se define como un concepto logístico que permite descargar la mercancía de vehículos entrantes y cargarla directamente en un vehículo saliente en instalaciones con poco o ningún almacenamiento intermedio. En esta investigación se abordó este concepto con el objetivo de incrementar la eficiencia del proceso de logística de distribución y eliminar las ineficiencias en la atención a los clientes en la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S en Santa Marta, Colombia. Se identificaron los beneficios de implementar un nuevo nodo tipo plataforma de *cross docking* directo, lo que permitiría reducir los tiempos en ruta y los gastos de transporte, solucionar las desviaciones en su plan estratégico de seguridad vial y mejorar la calidad de vida de los auxiliares de distribución. Asimismo, se abordan los requerimientos necesarios para realizar la correcta implementación de una plataforma de *cross docking* directa y se analizan los factores más importantes que se deben considerar con la introducción del nuevo nodo en la red de distribución, que determinan las características de diseño de las instalaciones y las herramientas de manipulación de cargas requeridas. Se describe paso a paso un plan de intervención para la implementación de la plataforma, atendiendo los posibles impactos que se puedan generar en los procesos operativos de recepción, procesamiento y alistamiento de las órdenes de compra y en la distribución. Esta última aglutinó la mayor parte de los cambios, como establecer la flota de vehículos local en la ciudad de Santa Marta para realizar la distribución y el diseño de nuevas rutas. La implementación de una plataforma de *cross docking* en la red de distribución de la empresa puede generar importantes ventajas y ahorros en los costos operativos, porque se prevé una reducción del 16,30% en el costo total de distribución, que representaría un ahorro anual de \$176.940.912 COP. Además, permitiría ajustar el tiempo en ruta acorde a la jornada máxima legal vigente, reduciendo las desviaciones en el plan estratégico de seguridad vial de la empresa. Con esto se logra optimizar las actividades de distribución a fin de obtener una cadena de suministro más eficiente y confiable.

¹ Magíster en Gerencia de la Cadena de Abastecimiento.

Contacto: icastel04729@universidadean.edu.co

² Ingeniero Químico y Doctor en Química.

Contacto: magonzalez@universidadean.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La cadena de suministro de una compañía está compuesta por todos los eslabones que contribuyen en la satisfacción de las necesidades de sus clientes para entregar un producto o servicio. La eficiencia de una compañía se puede determinar mediante la capacidad que tiene de entregar el producto final a sus clientes de acuerdo con la política de servicio establecida, en tiempo y cantidades, al menor costo posible. Por lo tanto, las organizaciones deben estar en la capacidad de gestionar sus operaciones para desarrollar su cadena de suministro de manera eficiente y de esta manera ser más competitivos y sostenibles, sobre todo si se consideran los cambios acelerados a los que se enfrentan las organizaciones actualmente.

La logística hace parte fundamental de la cadena de suministro y es la encargada de posicionar el inventario en los diferentes segmentos de la cadena de suministro, agregando valor a la cadena. La logística tiene a su cargo la administración de pedidos, el inventario, el transporte, el almacenamiento y el embalaje a lo largo de la red. La logística integrada permite la sincronización de la cadena de suministro para que esta se mantenga en una dinámica y constante generación de valor para sus clientes [1]. Consecuentemente, el objetivo principal de la logística es incrementar las ventajas competitivas a través de la gestión eficiente de los clientes mientras se logra un incremento sostenido de los ingresos provenientes de las ventas de los bienes o servicios. Además, la logística debe enfocarse en la reducción de costos para favorecer el logro de los objetivos estratégicos de las compañías [2].

Partiendo de la finalidad principal de la logística, se puede afirmar que estrategias como la implementación de plataformas logísticas de *cross docking*, que son instalaciones de transbordo sin ninguna gestión de inventario, nacen como una forma de gestionar de manera eficiente los costos asociados al almacenamiento y distribución que requieren de una gran demanda de recursos físicos y humanos para asegurar la conservación y movilización del inventario. Además, estas plataformas les permiten a las organizaciones reducir las ineficiencias generadas por la subutilización de la flota de vehículos utilizados en su proceso de distribución [3]. En otras palabras, las plataformas logísticas de *cross docking* contribuyen de manera significativa a optimizar los costos de transporte desde el punto de transbordo hasta el destino, incluso a través de múltiples destinos. Los transportes de mercancías se pueden consolidar opcionalmente y se pueden iniciar en un medio de transporte y finalizar en otro completamente diferente.

La empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. es una empresa del sector secundario o industrial perteneciente al Grupo Empresarial Nutresa dedicada a la producción y comercialización de derivados cárnicos como: carnes frías, carnes frescas maduradas, embutidos y vegetales enlatados, platos congelados listos para consumir y champiñones. Alimentos Cárnicos S.A.S. es líder de este segmento de mercado en Colombia con una participación del 58,2%, contando con 11 plantas de producción y 12 centros de distribución estratégicamente ubicados [4]. La distribución secundaria que realiza la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. desde el centro de distribución ubicado en Barranquilla hasta los 451 clientes o compradores en la ciudad de Santa Marta, que representan un volumen de ventas de 350 toneladas mensuales, se ve afectada por largos tiempos en ruta de hasta 14 horas diarias que van en contravía con lo establecido dentro de su plan estratégico de seguridad vial PESV y genera un alto riesgo de accidentabilidad.

Además, el elevado número de horas extras producto de las largas jornadas de trabajo encarece el costo de los fletes. A pesar de que la compañía ha podido mantener los costos de transporte en un nivel aceptable durante años, la compañía necesita implementar una estrategia que le permita la atención de los clientes de esta ciudad reduciendo su gasto de transporte y garantizando el cumplimiento de su PESV.

Con todo lo anterior, el objetivo de este trabajo es elaborar una propuesta de intervención de la distribución secundaria de la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. en la ciudad de Santa Marta a través de la implementación de una plataforma de *cross docking*. Con esto, se propone desarrollar un cambio estructural en la logística de distribución con la que se atiende este nodo para permitir un manejo eficiente del gasto de distribución de Alimentos Cárnicos S.A.S. Inicialmente, se diagnostica la condición actual del proceso de distribución que realiza la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. en la ciudad de Santa Marta. Posteriormente, se identifican los factores más relevantes de cara al diseño posterior y se diseña una estrategia de optimización para dar solución a la problemática de la distribución secundaria. Finalmente, se

determina la viabilidad de la propuesta con base en el análisis de costos beneficios. El desarrollo y contenido de esta investigación hizo parte del trabajo de grado de maestría de Castellanos-Pestana [5].

2. MÉTODO

Para valorar el proceso de distribución que realiza la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. en la ciudad de Santa Marta, se seleccionó una población objetivo que consta de 108 personas, que es la totalidad de las personas que hacen parte del proceso de logística de distribución de la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. en la regional Barranquilla. Por lo tanto, este estudio se inició con la recolección y posterior análisis de datos primarios a través de un enfoque inductivo [6]. Asimismo, se utilizó un modelo de muestreo no probabilístico de juicio o criterio [7]. La muestra establecida para esta investigación fue de 18 personas (nivel de confianza del 85% y margen de error del 15%). Concretamente, en los roles administrativos se cuenta con siete personas, en los roles de auxiliares de información se cuenta con nueve personas y en el área operativa se incluyeron los dos líderes de bandas que dirigen el proceso de alistamiento de pedidos.

Se hizo énfasis en el conocimiento específico que tenía cada una de las personas de acuerdo con el rol que cumple en el proceso de distribución con la finalidad de obtener información relevante para el desarrollo del diagnóstico inicial y las bases para la construcción de la propuesta de intervención. Para esto, se aplicó el cuestionario Anexo 1 como método principal para la recolección de información primaria que aborda temas como los recursos disponibles, las características de los clientes y los costos operativos. Para la construcción de esta encuesta se utilizaron preguntas cerradas de selección múltiple y abiertas para abordar la temática en la cual se requería profundizar y abarcar un mayor grado de conocimiento. Para la aplicación de la encuesta se empleó metodología online y los datos obtenidos fueron analizados cualitativamente mediante el software MAXQDA.

Partiendo de la información recolectada en la encuesta, se identificaron los aspectos que mayor impacto tienen en el proceso de logística de distribución para realizar una comparación entre los resultados del proceso y la propuesta de mejora que se elaboró. Las fortalezas y debilidades permitieron establecer cuáles son los aspectos que más impactos tienen en la operación y sobre estos se constituyó el referente para la investigación.

Se utilizó AutoCAD en la construcción de los planos de las instalaciones fruto del diseño de la estrategia de optimización para dar solución a la problemática de la distribución secundaria. Para generar las rutas propuestas bajo el nuevo modelo de distribución se utilizó Roadnet Transportation Suite, que es un software de soluciones de planificación, enrutamiento y despacho que tiene en cuenta la capacidad del vehículo, las reglas comerciales, así como los requisitos del cliente cuando realiza el enrutamiento para optimizar las rutas.

Finalmente, para la interpretación de los datos financieros, se utilizó el costeo basado en actividades desarrollado por Cooper y Kaplan [8] que permite analizar el consumo de los recursos por parte de la organización, permitiendo a los administradores buscar formas de reducir el consumo de recursos y disminuir el número de veces que se realizan actividades para alcanzar el mismo resultado.

Para el procesamiento de datos, se realizó una segmentación de la información recolectada a través del Anexo 1, lo que permitió abordar el diagnóstico desde la planeación estratégica, la distribución y los clientes, que son los aspectos esenciales para valorar la situación actual de la logística de distribución de la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. Además, se dispuso de información interna de la empresa [2], lo que permitió ampliar y concordar la información obtenida con la aplicación del instrumento de recolección de información.

El proceso de distribución que realiza Alimentos Cárnicos S.A.S. en la ciudad de Santa Marta inicia con la recepción de los pedidos que son de diferentes tipos. Para el canal moderno la recepción de pedidos se realiza a través de pedidos ZEDI (pedidos de venta mediante intercambio electrónico de datos Electronic Data Interchange o EDI). Para la toma de pedidos de los clientes comercializadores, el tipo de pedido

empleado es ZINT (pedido por internet) y se realiza mediante un portal habilitado en internet que utilizan los clientes directamente. Finalmente, para atender las necesidades del canal tradicional, se cuenta con tres tipologías de pedidos: ZDSD (pedido *mobile*), que son los pedidos que toma la fuerza de venta a través de las terminales portátiles habilitadas para este fin; pedidos ZVNO (pedido manual), que se montan directamente en SAP; y pedidos ZAPP (pedido por APPs), que emplea una aplicación móvil mediante la cual los clientes realizan la autogestión de sus necesidades de compra sin necesidad de la atención de un asesor comercial. Para la transmisión de pedidos, se tienen establecidos unos horarios de corte que permiten establecer el horario de ingreso de las personas encargadas de realizar el proceso de alistamiento de los pedidos: canal moderno y comercializadores 2:00 p.m., y tradicional 6:00 p.m.

Una vez recibidos los pedidos, son tratados por los auxiliares de información con rol de facturación que generan una etiqueta con códigos de barra para cada orden de compra. Posteriormente, es leída con una terminal de radiofrecuencia por los auxiliares logísticos encargados de hacer el proceso de alistamiento de los pedidos en las diferentes estaciones de trabajo. El alistamiento de los pedidos se encuentra dividido en dos líneas de trabajo de 10 estaciones cada una. Las líneas de trabajo se encuentran especializadas por canal, por lo tanto, se cuenta con una línea de trabajo para los pedidos del canal moderno y una línea de trabajo para los clientes del canal de comercializadores y tradicional.

Al final de la línea de procesamiento, las órdenes de compra se consolidan por clientes en estibas plásticas y pasan a la antecámara a la espera del vehículo asignado para el cargue. El tiempo estimado de alistamiento de las órdenes en cada una de las líneas es de 1,7 horas para los clientes del canal moderno y 1,2 horas para los clientes del canal de comercializadores y tradicional.

Una vez finalizada la preparación de las órdenes de compra, se le comparte el peso de los materiales facturados y la cantidad de canastas al coordinador de transporte. Este asigna los vehículos con los cuales se atenderán las rutas teniendo en cuenta las restricciones de capacidad máxima de carga y los acuerdos de nivel de servicio establecidos para los diferentes canales. El cargue de los vehículos inicia a las 2:00 a.m. aproximadamente y el tiempo empleado es de una hora en promedio. Una vez finalizado el cargue, el vehículo queda parqueado en el patio de maniobras hasta las 4:00 a.m. que llegan los auxiliares de distribución para iniciar el viaje hacia la ciudad de Santa Marta.

Los auxiliares de distribución inician su jornada laboral a las 4:00 a.m. y llegan a Santa Marta aproximadamente a las 6:00 a.m. Por lo general, todas las rutas llevan clientes del canal moderno. Por lo tanto, estos llegan a los diferentes puntos de venta de las cadenas Éxito, Olímpica, Metro, Carulla, Jumbo y autoservicios independientes con presencia local o regional. Los acuerdos de nivel de servicio pactados con los clientes del canal moderno que establecen ventanas de atención en las primeras horas de la mañana dificultan la posibilidad de reducir la cantidad de vehículos utilizados para realizar la distribución o aprovechar al máximo la capacidad de carga de los vehículos.

Según Mora [9], el costo de los fletes sobre la venta es uno de los indicadores más relevantes para medir el desempeño de la gestión de la distribución de una organización y sirve para conocer el porcentaje de los gastos por transporte y, de esta manera, permite aplicar medidas para reducir este importante costo. Para realizar el cálculo de este indicador según la ecuación (1), se toma el valor del gasto de transporte y la venta en un periodo de tiempo determinado que puede ser diario, semanal o mensual. Partiendo de la información del valor mensual del gasto por el concepto de fletes de \$105.492.634 COP y el valor de la venta promedio al mes estimada en \$2.830.000.000 COP, se procede a realizar el cálculo.

$$\text{Valor} = \frac{\text{Costo de flete}}{\text{Ventas}} \times 100$$
$$\text{Valor} = \frac{\$ 105.492.634}{\$ 2.830.000.000} \times 100 \quad (1)$$
$$\text{Valor} = 3,73\%$$

El indicador de costo del flete sobre la venta calculado para la distribución secundaria en la ciudad de Santa Marta es de 3,73%. Este resultado se considera bueno. Sin embargo, como se había expresado

anteriormente, la compañía busca alternativas que le permitan realizar gestión sobre el resultado de este indicador.

Otro indicador relevante para medir la eficiencia del transporte es tasar el porcentaje de ocupación vehicular que permite determinar el nivel de aprovechamiento que se está realizando de los recursos disponibles. Mediante la información de los kilogramos transportados y la capacidad máxima de carga de los vehículos, se realizó el cálculo de este indicador según la ecuación (2). Los kilogramos transportados diariamente son 8.885 kilogramos en promedio, valor que contrasta con los datos de la capacidad de carga máxima de 15.290 kilogramos.

$$\text{Valor} = \frac{\text{Kilogramos transportados}}{\text{Capacidad máxima de carga}} \times 100$$
$$\text{Valor} = \frac{8.885}{15.290} \times 100 \quad (2)$$
$$\text{Valor} = 58,1\%$$

El resultado de este indicador permite afirmar que la empresa cuenta con una oportunidad de mejorar el porcentaje de ocupación de sus vehículos y, de esta forma, aprovechar en mayor medida la capacidad instalada que posee. Con todo lo anterior se evidencia que el proceso de logística de distribución que realiza la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. posee una serie de fortalezas:

- F.1) Recursos disponibles para realizar la distribución secundaria ya que cuenta con un número adecuado de vehículos exclusivos para atender la demanda de los clientes, así como con la posibilidad de realizar modificaciones a la tipología de vehículos requeridos a través de subcontratación.
- F.2) Plan estratégico de gestión que le permite tener presente los objetivos estratégicos a corto, mediano y largo plazo para tomar medidas oportunas en busca del cumplimiento de las metas establecidas.
- F.3) Conocimiento amplio y suficiente de las características de los clientes que se atienden, por lo que se pueden realizar modificaciones en la red de distribución mientras se garantiza el cumplimiento de los acuerdos de servicio pactados.
- F.4) Posibilidad de generar sinergias con empresas del Grupo Nutresa para articular su red de distribución secundaria con otras empresas del grupo.

Sin embargo, se han identificado las siguientes oportunidades de mejora:

- O.1) Optimización de los costos de distribución sin menoscabo en la respuesta a las necesidades de los clientes.
- O.2) Reducción de horas extras generadas por los auxiliares de distribución que afectan directamente al costo del transporte y distribución ya que hace parte de los costos variables de las tarifas de los fletes.
- O.3) Mejora de la calidad de vida de los auxiliares de distribución, ya que los períodos de trabajo prolongados a las que se encuentran expuestos minimizan su tiempo para el descanso y esparcimiento.
- O.4) Incremento del porcentaje de ocupación vehicular que permita un mayor aprovechamiento de la capacidad de carga ofrecida por los vehículos.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección, se describe el plan de intervención que busca implementar una plataforma de *cross docking* en la ciudad de Santa Marta para abastecer las necesidades de los clientes de la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. en esta población. En contraste con la situación actual, el cambio en la red de distribución al introducir un nodo intermedio busca fortalecer la logística de distribución y responder a las oportunidades de mejora encontradas. Con este nuevo nodo, se puede realizar una planificación de las rutas con recorridos cortos y un mayor aprovechamiento de la capacidad de carga de los vehículos, puesto que se pueden adicionar más clientes por rutas al contar con mayor tiempo disponible por parte de los auxiliares de distribución. Lo anterior permitirá a su vez reducir los costos de distribución.

La nueva red de distribución está compuesta por un centro principal ubicado en la ciudad de Barranquilla donde se realiza toda la operación de alistamiento de pedidos y consolidación por rutas y una plataforma de *cross docking* directo en la ciudad de Santa Marta. En esta última no será necesario contar con instalaciones para el almacenamiento temporal y se limita su operación a transferir productos de un camión ubicado en el muelle de recepción hasta el muelle donde se encuentran ubicados los vehículos encargados de realizar la entrega local de las rutas.

Para la optimización de este nuevo nodo, se tuvieron en cuenta variables como peso y volumen de la carga a transportar, el número y la capacidad medida en peso y volumen máximo que puede transportar un vehículo, el costo de servicio de transporte por tipo de vehículo, los tiempos de servicio y las ventanas horarias que atienden los clientes, y la velocidad promedio. Asimismo, se tuvo en cuenta la necesidad de cumplir con los objetivos de minimización del costo fijo, la maximización del uso de la carga contratada y la maximización del número de entregas de órdenes de venta en un modelo que sea técnica y económicamente viable para su aplicación.

3.1 Procesos operativos

A continuación, se describen los procesos operativos relacionados con el procesamiento de las órdenes de compra solicitadas por los clientes que continúan a cargo del centro de distribución ubicado en Barranquilla.

3.1.1 Recepción de pedidos

Cuando la empresa recibe un pedido de un cliente, los detalles del pedido (incluidos los artículos, las cantidades de los artículos, los detalles de envío y las direcciones de entrega) ingresan al sistema de información SAP. Las órdenes de compra generadas por los clientes pueden ser de diferentes tipos: pedidos EDI, pedidos por internet, pedidos *mobile*, pedidos manuales y pedidos por APPs, tal y como se había expuesto anteriormente de acuerdo con el canal de venta al que pertenece el cliente. Una vez recibidas las órdenes de compra, estas son procesadas por los auxiliares de información con rol de facturación que proceden a generar una etiqueta con códigos de barra que contiene la información de los materiales requeridos para satisfacer las necesidades de los clientes.

3.1.2 Alistamiento de pedidos

Este es el proceso de recolección de una cantidad específica de artículos del inventario para satisfacer los pedidos de los clientes. La preparación de pedidos debe ser un proceso altamente controlado porque influye directamente en la productividad del flujo de trabajo general de procesamiento de pedidos: cuanto antes se preparen los pedidos con precisión, antes se pueden embalar y enviar. Para alistar los pedidos de manera eficiente, la compañía tiene implementado dos líneas de alistamiento que cuentan con 10 estaciones de trabajo cada una. En estas, los auxiliares de distribución leen la información contenida en las etiquetas a través de una terminal de radiofrecuencia que indica el material y las cantidades a enviar para satisfacer las órdenes de compra. Al final de la línea de alistamiento, se realiza la consolidación por cliente sobre estibas plásticas que luego son paletizadas a la espera del cargue en el vehículo encargado de realizar el transporte hacia la plataforma de *cross docking*.

3.1.3 Transporte

El transporte es el proceso operativo donde se contemplan cambios con la implementación de la plataforma de *cross docking* en la ciudad de Santa Marta, ya que se pasa de 6 vehículos que realizan la entrega directa a los clientes desde Barranquilla hasta Santa Marta a realizar el envío de todas las rutas en un único vehículo con una capacidad de carga equivalente a la sumatoria de los 6 vehículos actuales. Teniendo en cuenta que, fruto del análisis previo, el peso máximo total de las rutas que atienden la ciudad en mención corresponde a 9.749 kilogramos por día, es viable realizar el envío en uno de los vehículos tipo FVR con los que cuenta la compañía con capacidad de carga de 10.200 kilogramos. Por lo tanto, este vehículo se encargaría de movilizar la carga entre el centro de distribución ubicado en Barranquilla y la plataforma de *cross docking* en la ciudad de Santa Marta, donde se recibirían las estibas organizadas por rutas para ser cargadas en el

vehículo encargado de realizar la entrega final. En la Figura 1, se muestra un esquema del modelo de distribución propuesto con la implementación de la plataforma de *cross docking*. El cargue del vehículo se realiza con el orden preestablecido que tienen las rutas de acuerdo con su itinerario de entrega en el centro de distribución en la ciudad de Barranquilla, lo que facilita el trasbordo de estibas desde el camión de entrada hasta el camión de salida en la plataforma de *cross docking* en la ciudad de Santa Marta.



Figura 1. Modelo de distribución propuesto

Para la distribución final en la ciudad de Santa Marta, se contempla que la empresa de transporte Opperar Colombia S.A.S. utilice vehículos y personal local, con lo que se lograría un mayor aprovechamiento de la jornada laboral de los auxiliares de distribución, favoreciendo también el gasto de transporte cuyo valor se reduce al valor de un flete local. Además de localizar la flota en la ciudad de destino, se propone una reducción en el número de rutas pasando de 6 rutas a 5. La reducción de rutas se justifica en la mayor disponibilidad de tiempo con la que cuentan los auxiliares de distribución al eliminar el tiempo de desplazamiento entre las dos ciudades de la red de distribución inicial.

Tomando como base la información obtenida sobre el tiempo total de atención a clientes, se puede establecer que el día de la semana con mayor tiempo en ruta es el viernes con un tiempo de 41,93 horas para atender las entregas programadas. A continuación, se realiza una descripción de las nuevas rutas que cumplen con los parámetros requeridos por la empresa en cuanto a: tiempo en ruta acorde a la jornada máxima legal y aprovechamiento de la capacidad máxima de carga de los vehículos (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de rutas propuestas

Día	Ruta	Tiempo en ruta	Kilogramos por ruta	Horas en ruta	Tipo de vehículo
Lunes	BAF001_LUN	240	1.111	4,0	NHR
	BAF002_LUN	353	1.822	5,9	NPR
	BAF003_LUN	379	1.385	6,3	NKR
	BAF004_LUN	329	1.005	5,5	NHR
	BAF005_LUN	336	1.067	5,6	NHR
Martes	BAF001_MAR	494	1.812	8,2	NPR
	BAF002_MAR	490	793	8,2	NHR
	BAF003_MAR	527	636	8,8	NHR
	BAF004_MAR	502	1.264	8,4	NKR
	BAF005_MAR	501	962	8,3	NHR
Miércoles	BAF001_MIE	401	3.071	6,7	NPR
	BAF002_MIE	382	536	6,4	NHR
	BAF003_MIE	392	1.587	6,5	NKR
	BAF004_MIE	341	954	5,7	NHR
	BAF005_MIE	338	331	5,6	NHR
Jueves	BAF001_JUE	390	1.616	6,5	NPR
	BAF002_JUE	483	1.214	8,1	NKR
	BAF003_JUE	454	589	7,6	NHR
	BAF004_JUE	379	938	6,3	NHR
	BAF005_JUE	419	825	7,0	NHR
Viernes	BAF001_VIE	438	923	7,3	NHR
	BAF002_VIE	419	2.687	7,0	NPR
	BAF003_VIE	328	1.559	5,5	NKR
	BAF004_VIE	447	895	7,4	NHR
	BAF005_VIE	394	610	6,6	NHR
Sábado	BAF001_SAB	454	1.545	7,6	NKR
	BAF002_SAB	469	597	7,8	NHR
	BAF003_SAB	468	666	7,8	NHR
	BAF004_SAB	472	1.966	7,9	NPR
	BAF005_SAB	479	499	8,0	NHR

3.2 Participación de la dirección

El apoyo y la participación de la alta dirección son necesarios para la implementación exitosa de una plataforma de *cross docking*. Si bien esto puede parecer obvio, se requiere un alto nivel de compromiso con el desarrollo de esta iniciativa. La gerencia no solo debe apoyar el esfuerzo con respaldo financiero, sino también demostrar su respaldo y apoyo en todos los aspectos que involucre la propuesta. Una vez que la dirección se ha comprometido con el cambio en el modelo de distribución, se debe diseñar un plan de acción que arranque con la construcción de la agenda de cambio que contenga el paso a paso del plan que los llevará a una conclusión exitosa. Dentro de las actividades que debe desarrollar la dirección de la compañía para garantizar su apoyo a la implementación, se encuentran:

- *Conformación del equipo implementador*: Un programa de esta magnitud requiere el compromiso de empleados claves. Se trata de un esfuerzo funcional y debe ser reconocido como tal mediante el nombramiento de representantes de las funciones apropiadas de la empresa para participar en el equipo de implementación. La participación de las personas en el proceso puede variar, es decir, no todos los miembros del equipo serán requeridos a tiempo completo. Sin embargo, los miembros del equipo deben estar disponibles cuando sea necesario para mantener la implementación en marcha de acuerdo con el plan.
- *Comunicación de la propuesta*: Esta es la fase en la que se involucra el resto de la organización. Se requiere la participación tanto del equipo directivo como de los empleados no directivos. En esta fase, la dirección debería prever dónde encontrará una aceptación entusiasta del plan de cambio y dónde podrá encontrar resistencia. Si bien la aceptación en toda la organización es necesaria, es fundamental contar con apoyo cuando el programa se encuentra en las etapas iniciales.
- *Implementación de la propuesta*: La etapa de implementación real debe seguir dos aspectos principales. En primer lugar, es necesario abordar la configuración de los elementos físicos con la inclusión del nuevo nodo en la red de distribución. En segundo lugar, es necesario establecer los mecanismos laterales de comunicación dentro de la organización en el que se cuente con las diferentes áreas involucradas en la implementación.
- *Integración de áreas*: La integración comienza con las comunicaciones y progresa gradualmente a través de la coordinación, la cooperación y la colaboración. Uno de los principales requisitos es el entendimiento de las necesidades funcionales de cada área y los posibles cambios que se pueden presentar con la implementación. En este aspecto es primordial la flexibilidad de las personas para entender que prima el beneficio global sobre los intereses particulares. La integración comienza a nivel individual y gradualmente se construye una relación de confianza colectiva e involucra las relaciones humanas y los cambios tecnológicos y estructurales.

3.3 Inversión en tecnología informática

La inversión en tecnología busca facilitar el flujo de mercancía y el intercambio fácil y confiable de información. Según Mora [2], se hace necesario que las organizaciones que pretendan realizar la implementación de una plataforma de *cross docking* cuenten con socios comerciales que tengan implementadas tecnologías como la trasmisión de información vía EDI, codificación con códigos de barras y terminales de radiofrecuencia que permitan la lectura de los códigos de barras e interacción con el sistema de información.

La empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. tiene implementada la transmisión de los pedidos de sus clientes a través de EDI, que tiene como finalidad automatizar la generación, envío y registro de todas las transacciones electrónicas con los clientes: pedidos, avisos de envío, facturas electrónicas, etc. El EDI proporciona esta automatización al interactuar directamente con el *Enterprise Resource Planning* (ERP) de la empresa, es decir, cuando se recibe un mensaje EDI, este se integra directamente con el ERP. Del mismo modo, cuando se envía un mensaje, automáticamente llega a la plataforma EDI donde se traduce y luego se envía al cliente. Contar con esta tecnología representa una ventaja al momento de realizar la

implementación de la plataforma de *cross docking* puesto que es uno de los requisitos fundamentales para facilitar el intercambio de información.

Los códigos de barras desempeñan un papel clave en la implementación de la plataforma de *cross docking* permitiendo la identificación de las órdenes de compra de manera fácil y ágil. Al ingresar el vehículo a la plataforma de *cross docking* y posicionarse en el muelle de recepción, se hace la lectura de las etiquetas con la información que permite identificar el destino final de cada orden de compra y la asignación a su respectivo vehículo.

El último elemento necesario para la implementación de la plataforma de *cross docking* con relación a los requerimientos tecnológicos, son las terminales de radiofrecuencia con las que se realiza la lectura de los códigos de barras. Generalmente, las terminales de radiofrecuencia se utilizan principalmente en el proceso de gestión de almacenes en el entorno de distribución, ya que maneja de manera eficiente los enormes volúmenes de requisitos de procesamiento de datos transaccionales y minimiza las intervenciones humanas. En la plataforma de *cross docking* esta tecnología en asocio con las etiquetas de códigos de barras garantizan el dinamismo y reduce los errores en la transición de estibas desde el vehículo de ingreso al encargado de realizar las rutas locales.

Validando los recursos tecnológicos que se requieren para la implementación de la plataforma de *cross docking* en la ciudad de Santa Marta, se puede afirmar que la compañía Alimentos Cárnicos S.A.S. cuenta con los recursos tecnológicos necesarios en el centro de distribución de Barranquilla y solo requiere hacer extensiva esta tecnología al nuevo nodo que integraría la red de distribución.

3.4 Sincronización del tiempo de entrega

Según Mora [2], se debe planificar y coordinar cuidadosamente el ingreso de los vehículos a la plataforma de *cross docking*. Una de las alternativas que se puede emplear, es la asignación de citas o reservas de horarios de tal forma que se pueda garantizar la disponibilidad de los recursos para atender oportunamente el vehículo de entrada y garantizar el flujo continuo de las estibas que contienen las órdenes de compra hacia los vehículos que realizan las rutas locales. La programación de camiones en las plataformas de *cross docking* se ha investigado extensamente y se cuenta con gran cantidad de modelos matemáticos que buscan dar solución a la problemática de asignación de vehículos a los muelles para descargar y transferir las estibas a los camiones encargados de continuar la entrega de los pedidos [10, 11].

No obstante, en la presente investigación no se plantea la utilización de modelos matemáticos para la gestión de la programación de vehículos debido a que se cuenta con un solo vehículo de entrada a la plataforma y se propone que se maneje bajo el modelo de agendamiento de cita, lo que permite contar con un horario fijo para el ingreso del vehículo a la plataforma. Se determina que este vehículo debe estar en las instalaciones de la plataforma de *cross docking* a las 5:00 a.m., por lo tanto, esta es la hora pactada. Este horario permite realizar la transferencia de las estibas a los vehículos locales y garantizar la salida de estos antes de las 6:00 a.m.

De esta manera se garantiza el cumplimiento de los acuerdos de servicio que se tienen establecidos con los clientes. A los vehículos de entrega local se les asigna el mismo agendamiento de tal forma que coincida la llegada de los vehículos entrantes y salientes. La asignación de vehículos de salida se realiza de acuerdo con el itinerario de entrega de los clientes.

3.5 Limitaciones del espacio

Por lo general, el espacio físico destinado para realizar las operaciones de *cross docking* es limitado. Es por esto por lo que se debe proceder con el diseño de la instalación (forma y tamaño) para garantizar la máxima eficiencia. Un gran número de variables influyen en el frente y fondo de la instalación, y un número significativo de ellas están estrechamente interrelacionados. Según Palma [12], el diseño de la terminal de *cross docking* juega un papel importante cuando se realizan actividades y permiten apoyar la reducción de los costos operativos. La forma del *cross docking* se define mediante la letra correspondiente a las formas

I, L, U, T, H, X, W. Para elegir el diseño influyen diferentes aspectos como el tipo de productos, los cambios en la demanda, los volúmenes de materiales y el tipo de vehículos utilizados. Se establece que la forma de I es la más utilizada y eficiente para *cross docking* pequeños como el que se propone implementar para Alimentos Cárnicos S.A.S. en la ciudad de Santa Marta. Además, se establece que el diseño debe contar con dos puertas, una destinada para el camión de ingreso y la puerta contigua donde se posiciona de manera seguida el vehículo de salida como se muestra en la Figura 2.

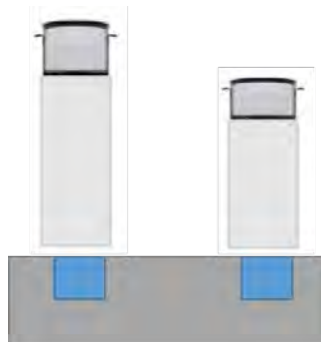


Figura 2. Diseño de plataforma propuesto

Teniendo en cuenta las dimensiones de la carrocería de los vehículos a posicionarse en los muelles de la plataforma de *cross docking* (Tabla 2), se puede realizar una aproximación de las dimensiones mínimas de espacio que se requiere para realizar la operación al interior de la plataforma de *cross docking*. Otra variable importante que permite determinar el área requerida para realizar la operación de la plataforma es el radio de giro requerido por los equipos de movilización de carga.

Tabla 2. Dimensión de camiones entrantes y salientes de la plataforma de *cross docking*

Tipo de vehículo	Largo	Ancho	Alto
NHR	3,0	1,8	1,9
NKR	4,0	2,1	2,0
NPR	4,5	2,3	2,1
FVR	7,2	2,6	3,9

El radio de giro de los equipos de maniobra propuestos, estibadores manuales, es de 2,18 metros de acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante [13]. Con base en esta información, se realizó el diseño de la plataforma de *cross docking* que se puede observar en la Figura 3, donde se cuenta con un área de 24 metros cuadrados con unas dimensiones de 8 metros de frente y 3 metros de fondo.

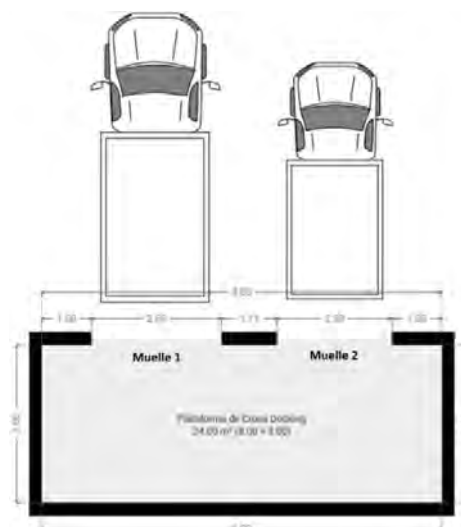


Figura 3. Diseño estructural propuesto para la plataforma de *cross docking*

En la parte frontal de la plataforma se propone contar con dos muelles para la operación. El muelle 1 debe contar con una dimensión acorde al vehículo de ingreso a la plataforma. Por lo tanto, el vano de la puerta

debe ser de 2,60 metros. El muelle 2 debe contar con una dimensión acorde a la tipología de vehículos encargados de realizar la distribución local. Por lo tanto, este debe disponer de una puerta de 2,30 metros. Se calcula un espacio entre las puertas de los muelles de 1,11 metros y un espacio de 1,0 metro en los laterales para facilitar el parqueo de los vehículos con la finalidad de reducir la probabilidad de que se presenten colisiones al momento de parquear los vehículos en los muelles. Adicionalmente, las dimensiones propuestas permiten el desplazamiento de los equipos de manipulación de carga tipo estibadores manuales al interior de la plataforma al ofrecer un espacio superior al necesario para realizar su radio de giro.

3.6 Equipamiento

Para realizar la manipulación de materiales dentro de la plataforma de *cross docking* se requiere la utilización de equipo especializado. Se puede elegir entre sistemas de movimiento manuales, parcialmente automatizados o totalmente automatizados para la movilización de carga al interior de la plataforma de *cross docking*. La elección de un proceso manual o automático depende de varios factores. El equipo automatizado requiere mucho capital. Para cualquier área de instalación dada, es difícil justificar el alto costo de capital para equipos automatizados para volúmenes muy bajos. A medida que aumenta el volumen, la automatización se vuelve económicamente viable. Por lo tanto, el volumen será uno de los principales factores decisivos a la hora de elegir entre automatización manual, parcial o completa.

La eficiencia general de cualquier operación manual depende fundamentalmente de la distancia a la que deben moverse las mercancías por medios manuales. Cuanto mayor sea la distancia para recorrer en la instalación, mayores serán las ineficiencias inherentes al sistema. Esto determina la forma y el tamaño de una instalación y da cuenta de los hallazgos que recomiendan la forma de un muelle en forma de I. Esta forma minimiza la distancia total recorrida y, por lo tanto, mejora la eficiencia.

Teniendo en cuenta el volumen de la operación propuesto en la plataforma de *cross docking*, se plantea que la movilización de estibas se realice mediante estibadores manuales. Estos equipos disponen de una horquilla con dos brazos paralelos unidos a ruedas que ingresan bajo las estibas. Una vez posicionados en la estiba, levantan la estiba y facilitan la movilización de la carga mediante la acción de un mecanismo hidráulico. Su funcionamiento depende directamente de la fuerza aplicada por el operario y es ideal para el traslado horizontal corto de cargas sobre estibas.

3.7 Recursos humanos

La introducción y el despliegue de la plataforma de *cross docking* afectará las necesidades de recursos humanos de la compañía. Será necesario contar con personal adicional a tiempo completo en los niveles necesarios para la administración de las operaciones en la nueva plataforma, lo que significará un aumento de personal. El proceso de contratación del personal para la plataforma debe estar coordinado con el despliegue previsto de inicio de las operaciones. Se propone que Alimentos Cárnicos S.A.S. asuma toda la responsabilidad de liderar el proceso de contratación del personal. También debe liderar el desarrollo de descripciones de puestos, clasificación y capacitación, y desarrollo de todo el personal que estará a cargo de la plataforma de *cross docking*. Además, se requerirá personal adicional para desempeñar diversas funciones para la implementación exitosa de la nueva estructura de red de distribución. A continuación, se hace una descripción de los roles y funciones a desempeñar:

- *Supervisor de logística de distribución*: Este cargo será responsable de la gestión y ejecución general de todas las actividades de distribución y transporte desde la plataforma de *cross docking* hasta los clientes de la ciudad de Santa Marta. Esta función también será responsable de capturar y mantener datos e información necesarios para la generación de informes de gestión.
- *Auxiliar de logística de distribución*: Este rol realizará las funciones operativas dentro de la plataforma de *cross docking* e incluirá la recepción, la clasificación, el despacho y todo el manejo de los materiales recibidos en el vehículo de entrada. Esta persona también debe recibir las devoluciones y material de embalaje cuando los vehículos locales finalicen sus rutas.

Con los roles antes mencionados se cubre la necesidad de recursos humanos para la operación del nuevo nodo en la ciudad de Santa Marta.

Los auxiliares de distribución estarían a cargo de la empresa de transporte Opperar Colombia S.A.S., ya que la modalidad de transporte se realizaría mediante el pago de fletes. Las actividades de gestión de flotas para el ingreso a la plataforma y la flota de distribución local serán gestionadas y controladas conjuntamente entre Alimentos Cárnicos S.A.S. y Opperar Colombia S.A.S. La gestión de la flota incluirá una serie de funciones como mantenimiento, gestión de combustible, gestión de la velocidad y maximización del rendimiento de la flota. El coordinador de transporte con sede en Barranquilla tendrá la responsabilidad general de toda la flota de vehículos y trabajará de la mano con el supervisor de logística de la plataforma para controlar y administrar la flota, y garantizar la eficiencia.

3.8 Análisis de costos basados en actividades

Las actividades logísticas están orientadas a crear valor para consumidores y la capacidad de la empresa para producir y entregar valor depende de su capacidad para suministrar a los consumidores sus productos en el lugar y momento en que desean adquirirlos, a precios competitivos y al menor costo total. Para lograr el nivel requerido de servicio al cliente al menor costo total, es fundamental analizar las actividades logísticas presentes en la empresa y el costo que estas actividades generan. La medición de costos asociados a la actividad logística es fundamental porque con este valor es posible calcular los diferenciales de costos derivados del comportamiento de la empresa.

A través de la reducción del costo de la actividad logística es posible trasladar esta reducción al precio pagado por el consumidor, haciendo más competitiva y económica la oferta de la empresa y mejorando la economía de toda la cadena de suministro. Según [14], el sistema de costos basados en las actividades puede definirse como un sistema para calcular los costos de actividades individuales y asignar esos costos a objetos de costo como productos, clientes y canales de entrega sobre la base de las actividades realizadas para producir cada producto.

Para gestionar las operaciones, los directores de las organizaciones necesitan información precisa para identificar las oportunidades de reducción de costos y rediseñar sus procesos logísticos con el objetivo de hacerlos más eficientes. De acuerdo con Goldsby y Closs [15], el éxito de estos intentos depende de la capacidad de análisis de los costos operativos para identificar los recursos consumidos para un producto específico, canal de adquisición o actividad logística. El nivel de detalle y complejidad de esta información depende de los productos, servicios y canales de entrega utilizados.

El análisis de costos para cada actividad permite una asignación más eficiente de los recursos identificando la reducción de costos y las oportunidades de inversión en nuevas tecnologías porque informa de la rentabilidad real para cada cliente, producto o servicio. Un aspecto importante para la toma de decisiones lo plantea Arbeláez y Marín [16], al afirmar que el análisis de los costos son fundamentales para tomar decisiones, atender o no a un cliente, prestar el servicio en una determinada ruta, producir el servicio o contratarlo, evaluar proyectos, evaluar inversiones, analizar rentabilidades, y controlar y planear los recursos.

Para realizar un análisis de costos basados en actividades que permita evaluar la viabilidad de esta propuesta, se define que los costos de operación bajo techo que se realizan en el centro de distribución de Alimentos Cárnicos S.A.S., que incluyen las actividades de recepción de ordenes de compra, alistamiento y cargue de pedidos, no se ven afectados con el ingreso de la plataforma de *cross docking* en la red de distribución. Por lo tanto, hacen parte del análisis los costos en los que se incurre para movilizar los pedidos desde el centro de distribución hasta la plataforma, los costos de operación bajo techo en la ciudad de Santa Marta y los costos de distribución local. El costo total que representa la distribución que realiza la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. en la ciudad de Santa Marta asciende a \$105.492.634 COP al mes, valor calculado con base en el costo de los fletes consumidos para la atención de los clientes. Este valor es la referencia para contrastar los costos en los que se incurriría con la implementación de la plataforma de *cross docking* propuesta, que se exponen en la Tabla 3.

Tabla 3. Actividades y recursos necesarios para la implementación de la plataforma de *cross docking*

Actividades	Recursos
Transporte de entrada	Flete
Descargue de camión de entrada	Personal, Maquinaria y equipo
Cargue de vehículos locales	Personal, Maquinaria y equipo
Recepción de vehículos locales	Personal, Maquinaria y equipo
Recepción de devoluciones	Personal, Maquinaria y equipo
Recepción de devolución de canastas	Personal, Maquinaria y equipo
Administración	Personal, Equipos de cómputo, Equipos de oficina
Distribución local	Fletes
Instalaciones	Arriendo, Servicios

En la Tabla 4 se expone la proyección de costos de la operación de la plataforma de forma mensual considerando los recursos anteriores.

Tabla 4. Costos operativos de la plataforma de *cross docking*

Grupo de costos	Artículo	Cantidad	Valor unitario	Total
Muebles y enseres	Escritorio	1	\$ 64.000	\$ 64.000
	Sillas	3	\$ 46.000	\$ 138.000
	Equipos de cómputo	1	\$ 90.000	\$ 90.000
Arriendo	Locativo	1	\$ 3.200.000	\$ 3.200.000
	Terminal de radiofrecuencia	1	\$ 195.700	\$ 195.700
	Energía	1	\$ 380.000	\$ 380.000
Servicios	Agua	1	\$ 260.000	\$ 260.000
	Internet	1	\$ 120.000	\$ 120.000
Salarios y prestaciones	Supervisor de logística	1	\$ 3.492.672	\$ 3.492.672
	Auxiliar logístico	1	\$ 1.504.906	\$ 1.504.906
Maquinaria y equipo	Estibadores	1	\$ 67.750	\$ 67.750
	NHR 1	26	\$ 365.738	\$ 9.509.188
	NHR 2	26	\$ 365.738	\$ 9.509.188
Fletes	NHR 3	26	\$ 365.738	\$ 9.509.188
	NKR	26	\$ 402.629	\$ 10.468.354
	NPR	26	\$ 450.782	\$ 11.720.332
	FVR	26	\$ 1.173.780	\$ 30.518.280
Costos operativos				\$ 90.747.558

Los recursos necesarios para desarrollar las actividades administrativas requieren de mobiliarios como escritorio, sillas y equipos de cómputo para el cumplimiento de sus funciones. De igual manera, las actividades operativas requieren de terminales de radiofrecuencia. Para cubrir estos requerimientos, se plantea que el suministro se contrate bajo la modalidad de arriendo. De esta manera, se reduce el costo inicial de implementación y es posible asumir estos rubros como gastos que se pueden trasladar al estado de resultado como deducciones.

Para el cálculo del valor de los salarios, se incluyó el factor prestacional sobre los salarios base propuestos que son: para auxiliar logístico el salario mínimo (2021) \$908.526 COP y para el supervisor logístico se calculó con base en un salario de \$2.300.000 COP.

Finalmente, se puede realizar una comparación del costo del modelo de atención actual y el modelo de atención con la implementación de la plataforma de *cross docking* en la ciudad de Santa Marta. Se observa una reducción del 16,30% en el costo total de la distribución que representa un ahorro anual de \$176.940.912 COP. Además, permite ajustar el tiempo en ruta acorde a la jornada máxima legal.

4 CONCLUSIONES

La importancia de la logística de distribución en el mundo actual es un hecho innegable y su prominencia se traduce en cada actividad logística y en toda la cadena de suministro de cada empresa. La operación de distribución es indispensable, ya que proporciona el vínculo entre los clientes y la empresa, garantizando que los productos se trasladan del origen a su destino. Sin embargo, puede representar una parte significativa de los costos logísticos y su eficiencia puede afectar fuertemente a otras áreas de la cadena, ya

sea positiva o negativamente. Consecuentemente, las organizaciones procuran optimizar las actividades de distribución de manera constante a fin de obtener una cadena de suministro más eficiente y fiable.

En esta investigación se identificaron los beneficios de implementar una plataforma de *cross docking*, así como los requerimientos para su implementación. Además, se destacaron los factores más importantes que son necesarios considerar al implementar el modelo de distribución con la introducción del nuevo nodo en la red de distribución.

La principal conclusión que surge con el desarrollo de esta investigación es que la implementación de una plataforma de *cross docking* en la red de distribución de la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. en la ciudad de Santa Marta puede generar ventajas importantes y ahorros en los costos operativos. Cabe señalar que estos ahorros se realizan en circunstancias particularmente favorables porque además le permite a la organización dar solución a las desviaciones en la implementación de su PSV en cuanto al cumplimiento de la jornada máxima laboral de los auxiliares de distribución que atienden los clientes de esta población.

Además, les permite a estas personas mejorar su calidad de vida y mantener un equilibrio entre el tiempo destinado a sus actividades laborales y el dedicado al esparcimiento y compartir en familia. Estos ahorros podrían ser significativamente mayores si la empresa realiza la implementación a través de sinergias con empresas del Grupo Nutresa que actualmente tienen centros de distribución en la ciudad de Santa Marta. Con esto se podría apalancar parte del costo operativo y le permitiría maximizar la eficiencia del nuevo modelo de distribución propuesto.

Con respecto al diseño y la gestión de la plataforma de *cross docking*, es necesario tener en cuenta que factores como el tamaño de las instalaciones, el número y la capacidad de los vehículos de transporte de entrada y salida, el número de puertas disponibles para realizar el trasbordo entre vehículos y la disponibilidad de equipos para la movilización de carga entre vehículos impactan en el rendimiento global de la plataforma. Además, se debe considerar que un área de operaciones mayor a la realmente requerida aumentará el costo de la operación y tendrá efectos negativos en el rendimiento de la plataforma de *cross docking*. Si el objetivo es maximizar la capacidad de la plataforma, la estrategia de *cross docking* donde las estibas se transfieren entre vehículos sin realizar ninguna manipulación a los palés es la mejor solución.

Finalmente, es pertinente asegurar que la implementación de una plataforma de *cross docking* diseñada correctamente, implementada con conocimiento y comprensión, operada con los sistemas y recursos adecuados y utilizada para los productos correctos, fortalecería la cadena de suministros de la compañía y se convertiría en una estrategia de generación de valor.

REFERENCIAS

- [1] Bowersox D. et al. (2007). Administración y logística en la cadena de suministros. McGraw-Hill.
- [2] Mora L. (2016). Gestión logística integral. Ecoe Ediciones.
- [3] González E. y Becerra M. (2017). Cross-docking with vehicle routing problem. A state of art review. Dyna 84(200), 271-280.
- [4] Grupo Nutresa. (2020). Informe integrado 2020.
- [5] Castellanos I. (2022). Propuesta de optimización de la distribución secundaria de la empresa Alimentos Cárnicos S.A.S. en la ciudad de Santa Marta a través de la implementación de una plataforma de cross docking. Universidad Ean.
- [6] García J. et al. (2014). Metodología de la investigación, bioestadística y bioinformática en ciencias médicas y de la salud. McGraw-Hill.
- [7] Gallardo E. (2017). Metodología de la investigación. Universidad Continental.
- [8] Cooper R. y Kaplan R. (1991). Profit priorities from activity-based costing. Harvard Business Review 69(3), 130-135.
- [9] Mora L. (2008). Indicadores de la gestión logística. Ecoe Ediciones.
- [10] Chen F. y Chung L. (2009). Minimizing the makespan in a two-machine cross-docking flow shop problem. European Journal of Operational Research 193(1), 59-72.
- [11] Yu W. y Egbelu P. (2008). Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage. European Journal of Operational Research 184(1), 377-396.

- [12] Palma R. (2012). Diseño de un sistema de cross-docking para un centro de distribución de productos de consumo masivo. Universidad Francisco Gavidia.
- [13] Jungheinrich A. (2022). Estibadores manuales. Recuperado: <https://www.jungheinrich.co/productos/montacargas-el%C3%A9ctricos/estibadores/estibadores-manuales>
- [14] Ríos M. et al. (2012). Los costos basados en actividades como herramienta de gestión en las pymes. El caso de las empresas de servicios en México. Revista Iberoamericana de contabilidad de gestión 10(19), 1-21.
- [15] Goldsby T. y Closs D. (1993). Using activity-based costing to reengineer the reverse logistics channel. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 30(6), 500-514.
- [16] Arbeláez L. y Marín F. (2001). Sistema de costeo ABC aplicado al transporte de carga. Revista Universidad EAFIT 37(124), 10-20.

ANEXO 1. Encuesta para evaluar el estado actual del proceso de distribución secundaria que realiza Alimentos Cárnicos S.A.S. en la ciudad de Santa Marta

Segmento	Pregunta	Respuesta	
Planeación estratégica	Existen un procedimiento que especifique el tipo de sistema de distribución que se debe usar para realizar la entrega de pedidos	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	
	Existe una planeación de la distribución	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	
	Existe un número suficiente de vehículos en funcionamiento para atender la distribución planeada	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	
	Se entregan los pedidos de acuerdo con el horario pactado con los clientes	<input type="checkbox"/> Siempre <input type="checkbox"/> Casi siempre <input type="checkbox"/> En ocasiones	
Distribución	¿La distribución en Santa Marta se realiza a través de vehículos propios o contratados?	<input type="checkbox"/> Propio <input type="checkbox"/> Contratado	
	¿Cuál es el costo de costo del flete Barranquilla - Santa Marta?	\$	
	¿Cuál es el valor de los gastos de flete mensual?	\$	
	¿Cuál es la tipología de vehículos utilizados para realizar la entrega de pedidos en Santa Marta?	<input type="checkbox"/> Luv <input type="checkbox"/> NHR <input type="checkbox"/> NKR <input type="checkbox"/> NPR <input type="checkbox"/> Sencillo	
		<input type="checkbox"/> Luv: <input type="checkbox"/> NHR: <input type="checkbox"/> NKR: <input type="checkbox"/> NPR: <input type="checkbox"/> Sencillo:	
	¿Cuál es la capacidad máxima en Kg de cada vehículo?	<input type="checkbox"/> Luv: <input type="checkbox"/> NHR: <input type="checkbox"/> NKR: <input type="checkbox"/> NPR: <input type="checkbox"/> Sencillo:	
	¿Cuál es la capacidad máxima en canastas de cada vehículo?	<input type="checkbox"/> Luv: <input type="checkbox"/> NHR: <input type="checkbox"/> NKR: <input type="checkbox"/> NPR: <input type="checkbox"/> Sencillo:	
		<input type="checkbox"/> Luv: <input type="checkbox"/> NHR: <input type="checkbox"/> NKR: <input type="checkbox"/> NPR: <input type="checkbox"/> Sencillo:	
	¿Cuántas rutas de entrega se realizan diariamente en Santa Marta?	<input type="checkbox"/> Luv: <input type="checkbox"/> NHR: <input type="checkbox"/> NKR: <input type="checkbox"/> NPR: <input type="checkbox"/> Sencillo:	
	¿Cuántos kilómetros recorren las rutas en promedio?	Km:	
	¿Cuál es la hora de inicio de las rutas?	___ : ___	
	¿Cuál es la hora finalización de las rutas?	___ : ___	
	Clientes	¿Cuál es la tipología de clientes que se atienden?	<input type="checkbox"/> Cadenas <input type="checkbox"/> Independientes <input type="checkbox"/> Tradicional Directo <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto
			<input type="checkbox"/> Cadenas: <input type="checkbox"/> Independientes: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto:
¿Cuál es la tipología de pedidos recibidos?		<input type="checkbox"/> Cadenas: <input type="checkbox"/> Independientes: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto:	
		<input type="checkbox"/> Cadenas: <input type="checkbox"/> Independientes: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto:	
¿Cuál es el horario de trasmisión de pedidos por canal?		<input type="checkbox"/> Cadenas: <input type="checkbox"/> Independientes: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto:	
¿A qué hora se inicia del alistamiento de pedidos de Santa Marta?		___ : ___	
¿Cómo se hace el alistamiento de los pedidos?			
¿A qué hora inicia el cargue de los vehículos de Santa Marta?		___ : ___	
¿Cuál es el tiempo estimado de cargue de los vehículos?		___ : ___	
¿Cuántos clientes se atiende en la ciudad de Santa Marta, por tipología?		<input type="checkbox"/> Cadenas: <input type="checkbox"/> Independientes: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto:	
	<input type="checkbox"/> Cadenas: <input type="checkbox"/> Independientes: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto:		
¿Cuántos clientes de la ciudad de Santa Marta cuentan con un horario de entrega pactado, por tipología?	<input type="checkbox"/> Cadenas: <input type="checkbox"/> Independientes: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto:		
¿Cuál es el volumen de venta por tipología de clientes diario?	<input type="checkbox"/> Cadenas Kg: <input type="checkbox"/> Independientes Kg: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo Kg: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto Kg:		
	<input type="checkbox"/> Cadenas Kg: <input type="checkbox"/> Independientes Kg: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo Kg: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto Kg:		

¿Cuál es la frecuencia de entrega por tipología clientes?	<input type="checkbox"/> Cadenas: <input type="checkbox"/> Independientes: <input type="checkbox"/> Tradicional Directo: <input type="checkbox"/> Tradicional indirecto:
¿Cuál es la numérica de clientes por frecuencia de entrega?	<input type="checkbox"/> Lunes: <input type="checkbox"/> Martes: <input type="checkbox"/> Miércoles: <input type="checkbox"/> Jueves: <input type="checkbox"/> Viernes: <input type="checkbox"/> Sábado:
¿Cuál es el valor promedio de la venta diaria?	\$ _____
¿Cuál es el valor promedio de las devoluciones generadas diariamente?	\$ _____
¿Cuántas canastas de devolución se generan en promedio diariamente?	Cantidad: _____

Proceso analítico jerárquico como método para el análisis de la sostenibilidad de proyectos industriales en etapa de prefactibilidad

Juan Sebastián Pérez Vallejo¹

Mauricio Esteban Sánchez²

Sandra Carolina Agudelo Arbeláez³

Juan Carlos Cruz Jiménez⁴

Universidad de Antioquia

Colombia

Al formular proyectos industriales es importante contemplar y analizar la sostenibilidad desde sus etapas iniciales, debido a que tradicionalmente durante la preparación se da mayor rédito a la viabilidad financiera de una actividad productiva, en términos principalmente de utilidad y periodos de retorno de inversión; dejando en un segundo plano consideraciones ambientales que pueden acarrear impactos a la naturaleza, la salud humana y la seguridad social, perjudicando en el tiempo el desarrollo del proyecto. Durante la etapa inicial de proyectos industriales se requiere la integración sistemática de variables económicas, ambientales y sociales, que puedan ser medidas y comparables. En este sentido, en este trabajo se presenta un marco metodológico basado en el Proceso Analítico Jerárquico AHP, el cual se ha convertido en una herramienta de evaluación multicriterio para la toma de decisiones. En esta investigación se propone incorporar al método AHP los resultados previos de técnicas convencionales para la evaluación de proyectos y actividades, como indicadores CAPEX, VPN, B/C, CAUE y TIRM, que provienen de evaluaciones financieras de proyectos y hacen parte de la dimensión económica. Igualmente, se integran los resultados de la evaluación de impacto de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida ACV, que hace parte de las dimensiones ambiental, de salud humana y seguridad social.

¹ Ingeniero Ambiental y Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental.

Contacto: *jsebastian.perez1@udea.edu.co*

² Ingeniero Químico y Magíster en Ingeniería.

Contacto: *mauricio.sanchez@udea.edu.co*

³ Ingeniera Química, Especialista en Ingeniería Ambiental y Magíster en Ciencias Ambientales y del Suelo.

Contacto: *scagudelo@gmail.com*

⁴ Ingeniero Químico, Doctor en Filosofía y Posdoctor en Ciencia de los Materiales e Ingeniería.

Contacto: *ccruzj@gmail.com*

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia de los diferentes tipos de industria a lo largo de la cadena de valor en la economía mundial, el desarrollo y diseño de nuevos productos y procesos tiene un papel crucial en la reducción de las cargas ambientales y el logro de la sostenibilidad. En este sentido poder identificar y medir los impactos ambientales en las etapas iniciales de un proyecto es fundamental, debido a que permite determinar la viabilidad de este en todo su ciclo de vida.

Por lo tanto, el concepto aplicado de sostenibilidad busca la protección del medio ambiente, el crecimiento de la economía y el proporcionar condiciones saludables de vida social [1]. En consecuencia, la industria en general se enfrenta a la necesidad de incorporar de forma equilibrada en su producción los aspectos económicos, ambientales y sociales, sin socavar los sistemas naturales de los que depende; por lo tanto, uno de los principales desafíos para el sector industrial corresponde a determinar y medir el desempeño de la sostenibilidad de productos y procesos [2]. Sin embargo, las investigaciones centradas en la sostenibilidad de proyectos aún son incipientes y fragmentadas [3], así mismo, es un campo emergente y a pesar de su importancia, existe actualmente el problema de incorporarlo en las organizaciones debido a que tradicionalmente se valoran las ganancias por encima de las dimensiones sociales y ambientales [4].

Adicionalmente, la técnica convencional para la formulación y evaluación de proyectos en sus etapas iniciales se concentra en términos generales en la ejecución de una serie de determinaciones individuales, como es el caso del análisis de mercado, el análisis técnico - operativo, el análisis económico - financiero y el análisis socio-económico, que permiten desarrollar juicios y conclusiones para la toma de decisiones en la viabilidad de un proyecto. No obstante, lo anteriormente descrito no elimina la necesidad de tomar una decisión de tipo personal; es decir, el estudio no decide por sí mismo, sino que proporciona las bases para una decisión, debido que existen situaciones de tipo intangible para las cuales no hay técnicas evaluativas y esto ocasiona que la decisión final de problemas cotidianos sea tomada por una persona y no una metodología, a pesar de que ésta tenga aplicación generalizada [5].

Con respecto a la temática socioambiental, la Comisión Europea concluyó que la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) proporciona el mejor marco para evaluar los impactos ambientales potenciales de los productos actualmente disponibles [6]. Adicionalmente, existen investigaciones donde se evalúa la sostenibilidad de sistemas industriales explorando enfoques integrados basado en ACV [7]. En contexto, un ACV se constituye en una herramienta metodológica que permite evaluar los posibles impactos ambientales y los recursos utilizados a lo largo del ciclo de vida de un producto, proceso o sistema, es decir, desde la adquisición de la materia prima, pasando por las etapas de producción y uso, hasta gestión de residuos o reincorporación en la misma cadena productiva o en otra [8, 9]. Durante la evaluación de un ACV, los consumos de energía y materiales, sumado a la cuantificación de las emisiones ambientales se traducen en potenciales de impactos ambientales y a la salud humana [6].

En consecuencia, actualmente la evaluación de la sostenibilidad como un sistema que integra las dimensiones Ambiental-Social-Económica es complejo, debido a que existe un vacío de investigación en materia de armonización terminológica [10], sumado a que el proceso de toma de decisiones requiere estructuración y sistematización. En este sentido y con el fin de dar soporte a la toma de decisiones desde el ámbito de la sostenibilidad, se han utilizado técnicas multicriterio, tanto aisladas como integradas; entre ellas, el Analytic Hierarchy Process AHP, siendo la metodología integral más utilizada [11-13] y el más destacado de las áreas industriales de fabricación de productos [14].

El método AHP fue desarrollado por Thomas Saaty en la década de 1970 y es una técnica de análisis multicriterio de descomposición de estructuras complejas en sus componentes, ordenando estas variables en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia y finalmente los sintetiza para determinar su prioridad [14, 15]. La toma de decisiones también se basa en una escala numérica para comparaciones por pares, que se utiliza para indicar cuánto más importante es un factor con relación a otro, considerando los criterios. La escala numérica para ponderar los criterios del método AHP varía de 1 a 9, donde 1 significa la igualdad de importancia entre dos variables y 9 indica que una actividad es mucho más importante que la otra [14] (2, 4, 6 y 8 son valores intermedios de importancia).

De acuerdo con lo anterior esta investigación tiene el objetivo de ilustrar la aplicación del método AHP y la proposición de subcriterios para el análisis de la sostenibilidad de proyectos industriales. Por lo tanto, se adoptaron a manera de ejemplo algunos de los resultados preliminares obtenidos durante el desarrollo del trabajo de grado titulado Evaluación de la sostenibilidad de la síntesis de celulosa mediante el uso de líquidos iónicos EMIM[AoC] y residuos agroindustriales (flores), a escala industrial; el cual fue presentado en la Maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Antioquia [16]. Los resultados acogidos corresponden a una evaluación financiera y una evaluación de impactos de ACV para dos alternativas de proyectos. Se propone para la metodología de esta investigación que los resultados preliminares indicados anteriormente se conviertan en los subcriterios que alimentarán el modelo analítico jerárquico.

Con este estudio también se busca que las variables utilizadas y el marco metodológico desarrollado para aplicar el método AHP en un contexto de análisis de sostenibilidad, pueda ser replicado en futuras evaluaciones y preparación de proyectos como lo hicieron en [2, 17, 18].

2. MÉTODO

En esta investigación se utilizó el software de licencia libre Total Decision®, el cual permite aplicar el método AHP de manera intuitiva. El proceso metodológico inicia con la formulación del objetivo de la técnica multicriterio el cual busca analizar la sostenibilidad entre dos proyectos hipotéticos denominados Proyecto (A) y Proyecto (B), con los cuales se ilustra la aplicación del método AHP.

Las alternativas de proyecto a comparar desde el ámbito de la sostenibilidad, ejemplifican una actividad productiva de obtención y comercialización de celulosa. En este sentido, se utilizan dos alternativas, una de ellas corresponde a un proceso convencional (Proyecto (A)) de síntesis de celulosa por medio del uso de ácido acético y ácido clorhídrico como solvente; mientras que la segunda alternativa es un proceso alternativo (Proyecto (B)) que simula la producción en similares condiciones de celulosa, usando como solvente un líquido iónico (LI). Estos últimos, han emergido como solventes efectivos y verdes por presentar propiedades como un bajo punto de fusión, no descomponer la celulosa, no ser tóxicos y permitir ser reciclados en los procesos químicos [19, 20].

Luego, se formularon tres (3) criterios de selección correspondientes a la dimensión ambiental, la dimensión económica y la dimensión de salud humana y seguridad. Estos criterios contextualizan el método AHP en el ámbito de análisis de sostenibilidad (Figura 1).

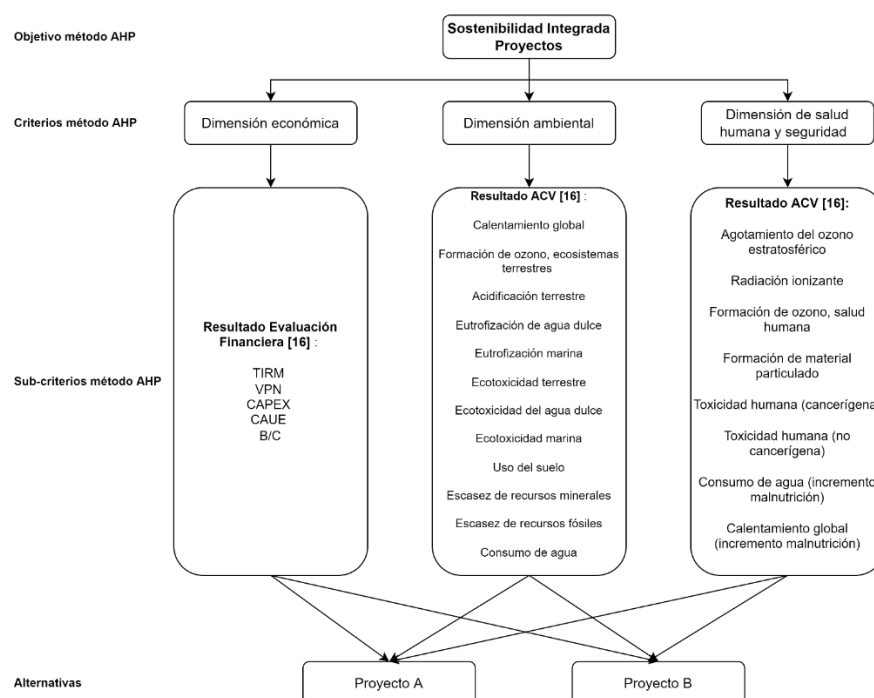


Figura 1. Modelo AHP para análisis de sostenibilidad

Posteriormente, en esta investigación se proponen diferentes subcriterios o variables para cada uno de los criterios de las dimensiones de la sostenibilidad como se puede observar en la Figura 1, y estas variables corresponden a los resultados del trabajo de grado en la Maestría en Ingeniería Ambiental desarrollado en la Universidad de Antioquia [16].

Los subcriterios definidos son medibles y comparables, y fáciles de determinar para cualquier proyecto en su etapa de prefactibilidad, además responde a las necesidades de determinación de viabilidad en el desarrollo de una actividad. Así pues, para alimentar el criterio de la dimensión económica se utilizaron indicadores correspondientes a: inversión en activos fijos CAPEX, Tasa Interna de Retorno Modificada TIRM, Valor Presente Neto VPN, Beneficio-Costo B/C y Costo Anual Uniforme Equivalente CAUE; los cuales se obtuvieron luego de simular cada uno de los procesos industriales de los Proyectos (A) y (B) en el software ASPEN PLUS®, donde se obtuvieron los balances de materia y energía que permiten consolidar un flujo de caja libre que indica las utilidades obtenidas de un proyecto luego de restar a los ingresos los egresos en un periodo de cinco años, y luego calcular los indicadores que conforman la evaluación financiera.

Para el caso de los subcriterios de las dimensiones ambiental, de salud humana y seguridad, se emplearon de igual forma los resultados del flujo de materiales obtenido en la simulación computacional y que permitieron desarrollar un Análisis de Ciclo de Vida ACV para cada alternativa con la ayuda del software SimaPro®. La evaluación del ACV calculó la carga potencial de 18 categorías de impacto socioambiental para cada alternativa [16].

2.1 Descripción de los proyectos ejemplo

Los dos proyectos que se analizaron comparativamente en esta investigación, incorporan como proceso industrial la obtención de masas fibrosas o pulpas a partir de biomasa lignocelulósica, lo anterior se denomina pulpeo o síntesis de celulosa; en donde por medio de procesos mecánicos, químicos o la combinación de ambas, se realiza la separación de la barrera de lignina externa para la exposición de la celulosa y la hemicelulosa [16]. Cabe señalar que en este trabajo no se tiene en cuenta el tipo y calidad de producto (celulosa), así mismo, no se contemplan las eficiencias de los procesos y equipos industriales, debido a que los resultados que se exponen a continuación se utilizan a modo de ejemplo para ilustrar el análisis de sostenibilidad.

Las condiciones generales que se acogen en el análisis de sostenibilidad corresponden a las características que se muestran a continuación, que fueron obtenidas por simulación computacional en el software ASPEN PLUS® y que hacen parte de los resultados de la investigación [16]. Se señala que los resultados de la simulación computacional se usaron tanto para evaluar financiera y ambientalmente el objeto de estudio definido en [16].

Como se observa en la Tabla 1, el proceso convencional (Proyecto (A)) utiliza en su proceso industrial como solvente el Ácido acético (CH_3COOH) y el Ácido clorhídrico (HCl), en comparación con el proceso alternativo (Proyecto (B)) que utiliza un líquido iónico de base EMIM.

Tabla 1. Flujos de entrada Proyectos (A) y (B) [16]

Nombre Sustancia	Cantidad por proceso (t/mes)	
	Proyecto (A)	Proyecto (B)
Biomasa	677,51	748,48
Solvente: Ácido acético (CH_3COOH) y Ácido clorhídrico (HCl)	29,62	-
Solvente : Líquido Iónico (EMIM)	-	0,004
Agua (H_2O)	253.430,72	2.160,37
Combustible	7.339.370,16	33.893,85
Energía eléctrica	23.884,71	3.852,00
Energía calorífica	64.555.978,6	210.441,28

En la Tabla 2 se ilustran los flujos de salida de las alternativas a estudiar. El proceso convencional (Proyecto (A)) genera mayores emisiones atmosféricas y agua residual en comparación con el proceso alternativo (Proyecto (B)). Ambas alternativas sintetizan al mes 300 toneladas de celulosa.

Tabla 2. Flujos de salida Proyectos (A) y (B) [16]

Nombre Sustancia	Cantidad por proceso (t/mes)	
	Proyecto (A)	Proyecto (B)
Celulosa	300,00	300,00
Agua Residual No Domestica (ARnD) para tratar	3.145,32	478,875
Emisión atmosférica dióxido de carbono (CO2)	24.616,91	105,7

2.1.1 Resultado evaluación financiera: Subcriterios dimensión económica

Para obtener los indicadores financieros que se muestran a continuación se desarrollaron flujos de caja, tanto para el proceso convencional como el alternativo. El precio de venta del producto (celulosa) fue de COP \$255.433. El resultado obtenido corresponde a que las inversiones en activos tangibles e intangibles CAPEX para el periodo inicial entre ambas alternativas es más alta para el Proyecto (B), con un valor de COP -\$1.594.304, en comparación con el Proyecto (A) que registra un costo de COP -\$1.519.304 [16]. En la Tabla 3 se observa que los Proyecto (A) y (B) son financieramente viables. En los cálculos de los indicadores la Tasa de Interés de Oportunidad TIO para ambos procesos fue de 10% Efectivo Anual [16].

Tabla 3. Indicadores de evaluación financiera Proyectos (A) y (B) [16]

Indicador Financiero	Proyecto (A)		Proyecto (B)	
VPN: (TIO) > 0	\$ 39.977.259.294	Financieramente viable	\$2.284.374.108.725	Financieramente viable
CAUE: CAUE (TIO) >0	\$10.545.900.291	Financieramente viable	\$602.612.135.075	Financieramente viable
TIRM: TIRM > TIO	11%	Financieramente viable	>100%**	Financieramente viable
B/C: B/C>1	1,06	Financieramente viable	424,16	Financieramente viable

**TIRM superior al valor de la TIO (269%>TIO)

Comparativamente, el Proyecto (B) presenta el VPN y el CAUE superiores al Proyecto (A). Lo que lo hace financieramente más atractivo, como se observa en la Tabla 4 .

Tabla 4. Comparación VPN y CAUE Proyectos (A) y (B) [16]

Indicador Financiero	Proyecto (A)	Comparación	Proyecto (B)	Mejor Alternativa
VPN	\$39.979.270.195	<	\$2.284.376.119.626	Proyecto (B)
CAUE	\$10.546.430.762	<	\$602.612.665.545	Proyecto (B)

2.1.2 Resultado ACV: Subcriterios dimensiones ambiental, de salud humana y seguridad

En la Tabla 4 se resumen los resultados del ACV utilizados del trabajo de grado de la maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Antioquia [16] y donde se evidencia que el Proyecto (A) es el que mayor impacto genera en comparación con el Proyecto (B). Lo anterior se debe principalmente a que el proceso convencional requiere de mayores cantidades de recursos naturales y de sustancias químicas, de igual forma, algunas sustancias generan mayor carga contaminante al ambiente.

Tabla 5. Resultados evaluación de impacto ACV (A) y (B)

Categoría de impacto	Unidad	Proyecto (A)	Proyecto (B)
Calentamiento global	kg CO ² eq	41.000.000,00	154.000,00
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	kg NOx eq	38.000,00	127,00
Acidificación terrestre	kg SO ² eq	91.000,00	300,00
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	360,00	2,70
Eutrofización marina	kg N eq	37,00	-0,90
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	18.000.000,00	84.000,00
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB	24.000,00	103,00
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	220.000.000,00	960.000,00
Uso del suelo	m ² a crop eq	60.000,00	337,00
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	15.700,00	100,00
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	10.900.000,00	48.500,00
Consumo de agua	m ³	470.000,00	3.400,00
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	14,00	0,04
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	250.000,00	862,00
Formación de material particulado	kg PM _{2,5} eq	29.600,00	106,00

Formación de ozono, Salud humana	kg NOx eq	37.080,00	121,00
Toxicidad humana (cancerígena)	kg 1,4-DCB	4.300.000,00	19.700,00
Toxicidad humana (no cancerígena)	kg 1,4-DCB	246.000.000,00	1.100.000,00

2.2 Ponderación de criterios y subcriterios

Una vez formulado el modelo jerárquico para el análisis de la sostenibilidad integrada, se realizó la ponderación de los criterios y subcriterios, para definir los pesos o importancias de cada uno por medio de comparaciones en pares utilizando la escala de Saaty [21] como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Escala de Saaty

Intensidad	Definición
1	Igual importancia
3	Moderadamente más importante un elemento que otro
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores
$a_{ij} = 1/a_{ji}$	Recíprocos

La ponderación de los criterios se hizo de manera equilibrada, otorgando la misma importancia entre los criterios que conforman las dimensiones de la sostenibilidad y generando una ratio de inconsistencia (RI) de 0,00%, lo que significa que existe una evidencia positiva de juicio informado en la calificación ponderada de los criterios como se observa en la Tabla 7. La asignación de valores igual a "1", se hizo con el fin de que ningún criterio tuviera mayor peso sobre otro y así obtener un $RI < 10\%$, lo que se traduce en un proceso metodológico sin desviación en la calificación de la sostenibilidad, manteniendo la equidad entre las dimensiones con igual importancia.

Tabla 7. Matriz de ponderación de criterios

Criterios	Dimensión Ambiental	Dimensión salud humana y seguridad	Dimensión económica
Dimensión Ambiental	1	1	1
Dimensión salud humana y seguridad		1	1
Dimensión económica			1

Como se observa en la Figura 2, para cada uno de los criterios del análisis se les asignó un peso del 33,33%, lo que va en línea con el concepto de sostenibilidad.

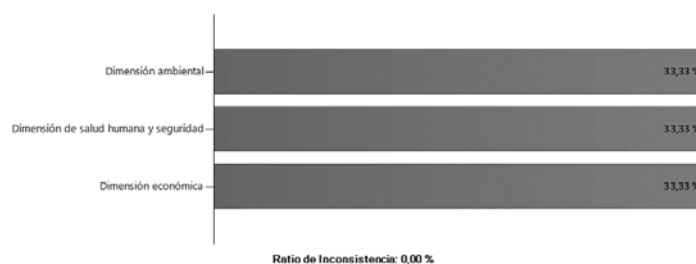


Figura 2. Pesos de ponderación de criterios

Para el caso de los subcriterios, se ponderaron igualmente de manera equilibrada, asignando el valor de uno (1) en la ponderación por pares. Para los doce (12) subcriterios de la dimensión ambiental se asignaron pesos iguales de 8,33% como se observa en la Figura 3.

En el caso de los ocho (8) subcriterios de la dimensión de salud humana y seguridad, se asignaron pesos iguales de 12,50% como se observa en la Figura 4.

En el caso de los cinco (5) subcriterios de la dimensión económica, se asignaron pesos iguales de 20,00% como se observa en la Figura 5.

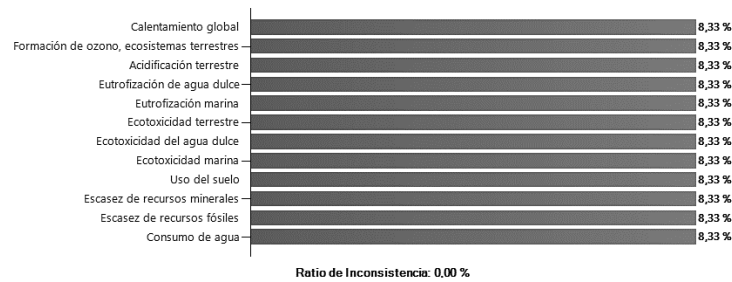


Figura 3. Pesos de ponderación dimensión ambiental

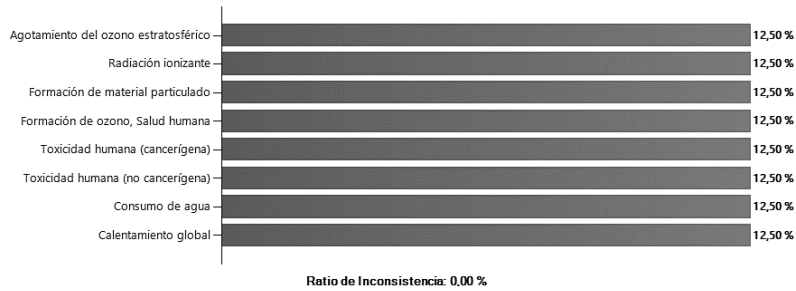


Figura 4. Pesos de ponderación dimensión de salud humana y seguridad

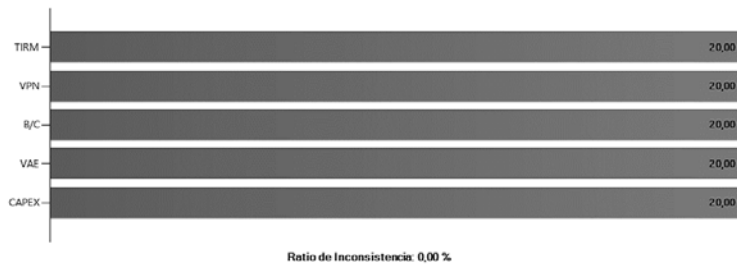


Figura 5. Pesos de ponderación dimensión económica

2.3 Valoración de alternativas

El último paso del método AHP consiste en realizar la valoración de las alternativas ingresando los resultados obtenidos de la evaluación financiera y de evaluación de impactos del ACV. En la 6 se muestra, a modo de ejemplo, la valoración de las alternativas para el subcriterio de Toxicidad de agua dulce, en donde se puede apreciar la diferencia de impacto generados entre los Proyectos (A) y (B). El tipo de valoración en este caso corresponde a Decreciente dado que, entre menor sea la concentración del indicador del aumento ponderado por peligrosidad en agua dulce (kg 1,4-DCB), será mejor la alternativa valorada.

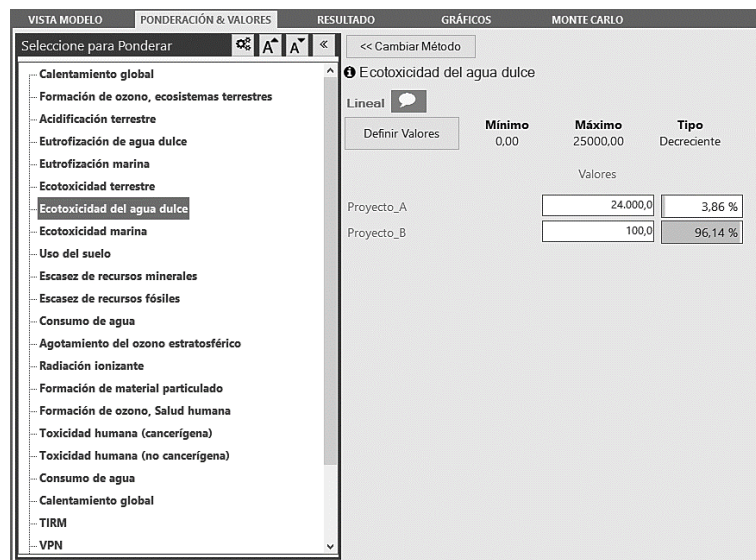


Figura 6. Entorno del software Total Decision® para la valoración de alternativas por subcriterios

Durante el proceso metodológico se presentaron subcriterios que se debían valorar por comparación por pares con ayuda de la escala de Saaty (Tabla 6), debido a que correspondía a variables que no se podían comparar de forma directa.

2.4 Análisis de Sostenibilidad

Luego de completar las evaluaciones de todos los criterios y subcriterios, se utilizaron las funciones de RESULTADO y GRÁFICOS del software Total Decision®; y se determinó cuál de las alternativas formuladas correspondía a la que presenta mejores características en el contexto de sostenibilidad. Finalmente, basado en los resultados porcentuales obtenidos en el software Total Decision®, se estableció una escala de colores (Tabla 8) para el análisis de sostenibilidad integrada entre las alternativas utilizadas como ejemplo (Proyecto (A) y (B)). Por último, se señala que el marco de análisis de sostenibilidad expuesto anteriormente tiene un carácter iterativo, lo cual significa que, en etapas futuras, como la factibilidad de proyectos, se pueden determinar nuevos indicadores o nuevos resultados que permitirá actualizar el modelo AHP.

Tabla 8. Escala de sostenibilidad

Escala de sostenibilidad	Valor (%)
No Sostenible	0-20
Poco Sostenible	21-40
Medianamente Sostenible	41-60
Sostenible	61-80
Muy Sostenible	81-100

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Dimensión económica

Desde la dimensión económica el Proyecto (B) es más sostenible con un 78,86% en comparación con el proceso convencional referente al Proyecto (A) que presenta un resultado del 21,14% como se observa en la Figura 7; lo anterior se explica porque muestra comparativamente mejores indicadores financieros. Cabe aclarar que según la evaluación financiera ambas alternativas de estudio son viables, pero comparativamente el proceso alternativo presenta mejores características.

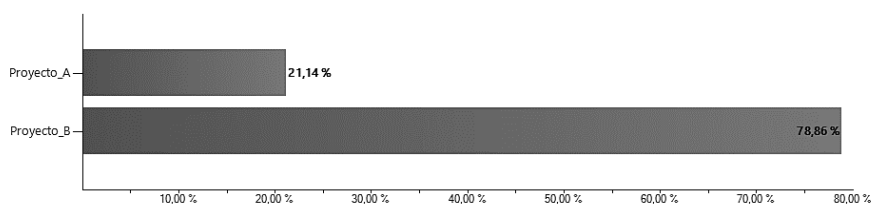


Figura 7. Sostenibilidad de las alternativas para dimensión económica

3.2 Dimensión ambiental

Desde la dimensión ambiental el Proyecto (B) es más sostenible con un 93,38% en comparación con el 6,62% del Proyecto (A) (Figura 8). Este resultado se explica debido a que la cantidad de materias primas que requiere el proceso convencional son superiores al proceso alternativo, esto genera mayores impactos ambientales por agotamiento de recursos naturales y toxicidad de ecosistemas como se muestra en los resultados de los subcriterios del método correspondientes al ACV.

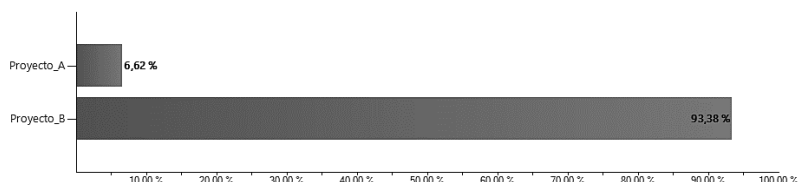


Figura 8. Sostenibilidad de las alternativas para dimensión ambiental

3.3 Dimensión de salud humana y seguridad social

Con respecto a la dimensión de salud humana y seguridad social, el proceso MCC-IL es más sostenible en un 86,25% (Figura 9) que el proceso convencional MCC-Ac con un 13,75%; debido a que la cantidad de materias primas que requiere el proceso acetosolv son muy elevadas con respecto al proceso de con EMIM[AoC]. Específicamente los requerimientos de energía eléctrica y gas natural, así mismo las salidas por emisiones de CO₂, son superiores y ocasionan potencialmente el aumento en el riesgo de incidencia de enfermedades no cancerosas y cancerosa.

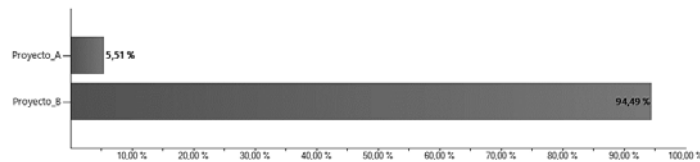


Figura 9. Sostenibilidad de las alternativas para dimensión de salud humana y seguridad social

3.4 Sostenibilidad de proyectos

Como resultado final de la aplicación del método AHP, se puede observar en la Figura 10 de manera integrada que, en las dimensiones económica, ambiental y de salud y seguridad humana, el Proyecto (B) es el que presenta mayores características de sostenibilidad en comparación con el Proyecto (A). Adicionalmente, se puede clasificar que el Proyecto (B) como Muy sostenible de acuerdo a la escala establecida en la Tabla 8.

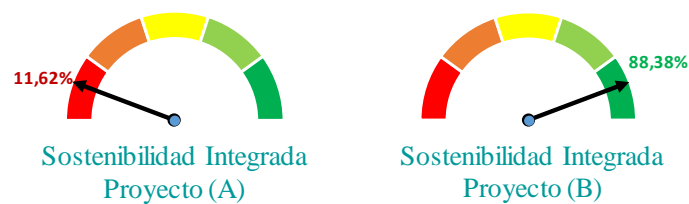


Figura 10. Sostenibilidad integrada de proyectos

3.5 Sensibilidad del análisis de sostenibilidad

Con el fin de evaluar la variabilidad del análisis de sostenibilidad de proyectos, el software Total Decision® permite visualizar gráficamente el cambio de pesos de importancia en los criterios de interés. En este sentido en la Figura 11, se puede observar que sin importar variaciones que se puedan hacer a la importancia de los criterios del modelo, siempre será más sostenible el Proyecto (B) para este caso de estudio ((a)Dimensión económica, (b) Dimensión ambiental y (c) Dimensión de salud humana y seguridad).

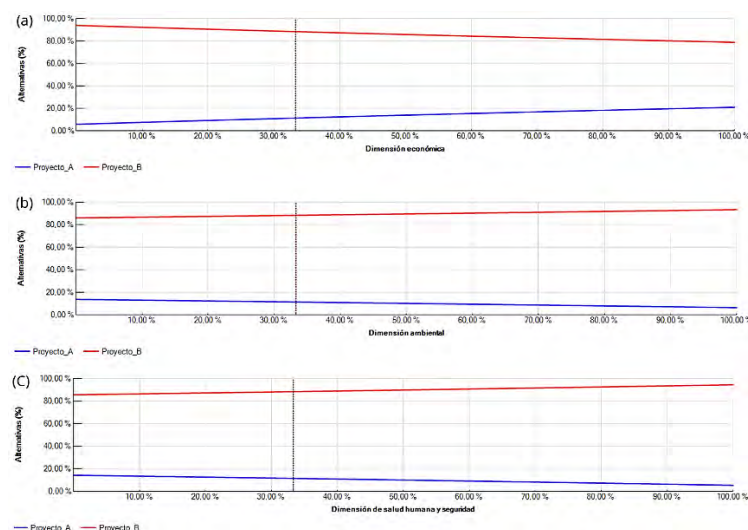


Figura 11. Sensibilidad criterios de evaluación modelo AHP para análisis de sostenibilidad

4. CONCLUSIONES

El análisis de la sostenibilidad de un proyecto es complejo, debido a que son múltiples los factores que se ven afectados durante la formulación y evaluación de estos, y así su viabilidad es imposible de predecir por un evaluador. Por este motivo es necesario abordar el problema a través de métodos multicriterio con el AHP.

El análisis de sostenibilidad por medio de la aplicación del método multicriterio AHP permite durante la formulación y evaluación de proyectos, tomar decisiones encaminadas a innovar con respecto a cambios tecnológicos o de materias primas frente a procesos convencionales. Esto se ilustró en el ejemplo utilizado en esta investigación, donde el proceso convencional fue inferior en todos los subcriterios escogidos frente al cambio de "Solvente" durante la obtención de celulosa.

La viabilidad financiera de un proyecto no significa que sea sostenible en el tiempo. Como se observó en el ejemplo desarrollado, pese a que tanto el Proyecto (A) como el Proyecto (B) tenían indicadores financieros sólidos, el Proyecto convencional genera mayores impactos negativos a las dimensiones ambientales y de salud y seguridad humana.

Emplear los resultados de evaluación financiera corresponden a estudios económicos que se realizan durante la formulación y evaluación de cualquier proyecto y se integran adecuadamente en el modelo multicriterio AHP como subcriterios de la dimensión económica.

Utilizar los resultados de la evaluación de impactos de un ACV como parte de los subcriterios del método AHP, que definen las dimensiones ambientales y de salud y seguridad humana, aportan una base sólida con rigor científico para diseñar mejores proyectos permitiendo identificar que tan impactantes serían.

Los subcriterios elegidos para consolidar el marco metodológico para el análisis de sostenibilidad se pueden obtener durante la etapa de prefactibilidad de proyectos y constituyen un aporte adicional al trabajo desarrollado por [2].

El software Total Decision® es una herramienta informática intuitiva y de acceso libre que ejecuta los principios del método AHP de manera adecuada. Su uso es para cualquier fin no comercial y económico, por lo que al momento de utilizarlo en un ámbito diferente al académico se recomienda emplear otras herramientas del mercado o desarrollar los procedimientos matemáticos establecidos por [15].

Se recomienda que en futuras aplicaciones de la metodología expuesta en este trabajo investigativo se utilice una cantidad mayor de evaluadores al momento de comparar por pares los subcriterios recomendados, esto con el fin de evitar sesgos individuales del tomador de decisiones.

Los procesos metodológicos empleados en este trabajo de investigación pueden ser replicados en otro tipo de proyectos de desarrollo o inversión en el sector industrial para evaluar su viabilidad desde un enfoque de sostenibilidad en la etapa de pre-factibilidad. Adicionalmente, la metodología utilizada es iterativa, lo que permite que se actualicen los indicadores o variables empleadas para futuros análisis.

REFERENCIAS

- [1] Dalalah D. et al. (2022). An integrated framework for the assessment of environmental sustainability in wood supply chains. *Environmental Technology and Innovation* 27, 102429.
- [2] Jia X. et al. (2016). Integrated sustainability assessment for chemical processes. *Clean Technologies and Environmental Policy* 18(5), 1295–1306.
- [3] Aarseth W. et al. (2017). Project sustainability strategies: A systematic literature review. *International Journal of Project Management* 35(6), 1071–1083.
- [4] Marnewick C. (2017). Information system project's sustainability capability levels. *International Journal of Project Management* 35(6), 1151–1166.
- [5] Baca G. (2010). *Evaluación de Proyectos*. McGraw-Hill.

- [6] Righi S. et al. (2018). Integrating life cycle inventory and process design techniques for the early estimate of energy and material consumption data. *Energies* 11(4).
- [7] Wang F. et al. (2019). Integrated sustainability assessment of chemical production chains. *Journal of Cleaner Production* 219, 894–905.
- [8] Ihobe. (2015). Análisis de ciclo de vida: Cómo medir el impacto ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Recuperado: <https://www.ihobe.eus/inicio>
- [9] Bjørn A. et al. (2017). LCA History. *Life Cycle Assessment* 17–30.
- [10] de Faria D. et al. (2021). Sustainability assessment for the chemical industry: Onwards to integrated system analysis. *Journal of Cleaner Production* 278.
- [11] Bolis I. et al. (2017). Are we making decisions in a sustainable way? A comprehensive literature review about rationalities for sustainable development. *Journal of Cleaner Production* 145, 310–322.
- [12] Diaz L. et al. (2017). Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review. *European Journal of Operational Research* 258(2), 607–616.
- [13] Sierra L. et al. (2018). A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *J. Clean. Prod.* 187, 496e513.
- [14] Dos Santos P. et al. (2019). The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications. *Journal of Cleaner Production* 212, 119–138.
- [15] Saaty T. (2006). Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. *European Journal of Operational Research* 168(2), 557–570.
- [16] Pérez J. (2022). Evaluación de la sostenibilidad de la síntesis de celulosa mediante el uso de líquidos iónicos (EMIM[AoC]) y residuos agroindustriales (flores), a escala industrial. Tesis de maestría. Universidad de Antioquia.
- [17] Ong M. et al. (2020). An integrated approach for sustainability assessment with hybrid AHP-LCA-PI techniques for chitosan-based TiO₂ nanotubes production. *Sustainable Production and Consumption* 21, 170–181.
- [18] Chang L. y Tan J. (2021). An integrated sustainability assessment of drinking straws. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(4), 105527.
- [19] Mäki P. et al. (2010). Dissolution of lignocellulosic materials and its constituents using ionic liquids-A review. *Industrial Crops and Products* 32(3), 175–201.
- [20] Isik M. et al. (2014). Ionic liquids and cellulose: Dissolution, chemical modification and preparation of new cellulosic materials. *International Journal of Molecular Sciences* 15(7), 11922–11940.
- [21] Bathrinath S. et al. (2021). Modeling sustainability risks in sugar industry using AHP-BWM. *Materials Today: Proceedings* 50, 1397–1404.

La deontología en la Ingeniería Industrial: Un análisis comparativo entre países

Ana C. Larrañaga Pastor¹

Cristina González Gaya²

Carlos de Lama Burgos³

Universidad Nacional de Educación a Distancia
España

La Ingeniería Industrial está presente en todos los sectores económicos y sociales, y es uno de los pilares para conseguir los objetivos de desarrollo sostenible ODS propuestos por la ONU. Dada su importancia estratégica en los ámbitos a nivel global, es esencial establecer criterios éticos sólidos que sirvan de referencia a los profesionales del área. Con los avances en la ciencia, la tecnología y la innovación, reflexionar y estudiar sobre los valores éticos que deben regir el ejercicio profesional toma cada día mayor relevancia. La deontología profesional toma cada vez más importancia en la mayoría de los campos en el que interviene el ser humano y analizarla en el ámbito de la Ingeniería Industrial se convierte en una necesidad. Este análisis debe hacerse desde una perspectiva global, abarcando diferentes países y culturas, porque no siempre son los mismos valores relacionados con la Ingeniería Industrial los que se protegen. La deontología como práctica profesional siempre se relaciona con hacer lo correcto y lo debido en el ejercicio de la profesión y, precisamente en el estudio y análisis de lo debido, se basan también los códigos deontológicos de la profesión, que son una serie de normas o pasos a seguir dentro de un ámbito concreto. Estos códigos se forman en base a la experiencia y estudio de los distintos profesionales de la Ingeniería Industrial, siendo al final la responsabilidad uno de los principales factores para cumplir con la deontología. ¿Existen diferencias culturales entre los países europeos y los latinoamericanos a la hora de tratar la deontología profesional? ¿Son los códigos deontológicos relacionados con la Ingeniería Industrial similares en los diferentes países? Este estudio analiza la deontología profesional en el ámbito de la Ingeniería Industrial, comparando códigos deontológicos de países en diferentes áreas geográficas.

¹ Licenciada en Derecho.

Contacto: ana.larranaga@coitim.es

² Doctor en Ingeniería Industrial.

Contacto: cggaya@ind.uned.es

³ Doctor en Ingeniería Industrial.

Contacto: carlos.lama@coitim.es

1. INTRODUCCIÓN

Según la Real Academia Española RAE, *la deontología es la parte de la ética que trata de los deberes en la esfera de la actividad profesional*. La deontología, por tanto, cubre el conjunto de costumbres y normas que se consideran buenas para dirigir o juzgar el comportamiento de las personas dentro del ámbito profesional, que no están o no pueden incluirse dentro de la legislación, y cuyo fin último es que la sociedad perciba un compromiso corporativo.

En el ámbito de la Ingeniería Industrial, la deontología cobra un especial interés, dado que analiza y trabaja objetivos esenciales para el desarrollo sostenible como la seguridad de las personas, los recursos hídricos o las energías limpias, pero también proporciona la tecnología y diseña los procesos a todos los sectores económicos para que su labor sea más eficiente.

La deontología fija unos criterios que, en este caso, debe cumplir la Ingeniería Industrial como colectivo, tanto en su relación con los usuarios de sus productos o servicios, como con los profesionales del mismo ámbito y con la sociedad en general.

Cuando un profesional de la Ingeniería Industrial incumple una norma deontológica no sancionada por la legislación, el suceso debe ser analizado y sancionado por el colectivo profesional representado en su Colegio Profesional para preservar el interés general de la sociedad y de los profesionales que operan en el mismo ámbito en particular.

Este trabajo analiza los diferentes códigos deontológicos que rigen la conducta de los Ingenieros industriales tanto en determinados países europeos como latinoamericanos, y realiza una comparativa sobre los valores a preservar, así como las sanciones que se imponen por el incumplimiento de estos.

El ejercicio de la profesión en el ámbito de la Ingeniería Industrial tiene una repercusión directa en la vida de las personas, tales como la seguridad, la economía y el bienestar. Y de esta circunstancia emana una ineludible responsabilidad de los propios profesionales de la Ingeniería Industrial como colectivo ante terceros, consensuando y haciendo cumplir unas normas éticas que regulen la moral y el comportamiento del ingeniero.

En la actualidad, existen numerosas normas deontológicas y diversos códigos éticos que están vigentes relacionados con la Ingeniería Industrial. Son normas que sirven de guía a los ingenieros industriales en la toma de decisiones, pero en ningún caso, se trata de una normativa rígida y exhaustiva de reglas de comportamiento profesional.

Estas normas están contenidas en los códigos deontológicos, éticos o de conducta que son elaborados por los propios miembros de la profesión en el seno de los colegios profesionales o asociaciones de ingenieros industriales.

En este trabajo se procede a analizar algunos ejemplos de estos documentos aprobados en el seno de las distintas organizaciones profesionales con el fin de conocer cómo se trata la ética profesional en el ámbito de la Ingeniería Industrial en diversos países.

2. ANÁLISIS Y DESARROLLO

Según la Real Academia Española RAE, *ética es el conjunto de normas morales que rigen la conducta de la persona en cualquier ámbito de la vida. Ética profesional, cívica y deportiva. Igualmente es la parte de la filosofía que trata del bien y del fundamento de sus valores*. Una de las definiciones de ética que tiene mayor acogida es la que la define como *la ciencia del comportamiento moral, obtenida mediante el análisis exhaustivo de la sociedad, que podría determinar cómo deben comportarse o actuar los miembros que a ella pertenecen* [1]. El incumplimiento de la ética no conlleva sanciones legales a quien no cumple con ello, a diferencia del código ético, que se trata de un documento que aglutina un conjunto amplio de normas, valores y criterios que pronuncian y aceptan los profesionales que llevan a cabo una determinada actividad

profesional, ocupándose de aquellos aspectos fundamentales del ejercicio de la profesión que regulan. Por último, indicar que la RAE define deontología como *el conjunto de deberes relacionados con el ejercicio de una determinada profesión*.

Las normas que afectan a una profesión, como es el caso de los ingenieros industriales, se pactan previamente y se aprueban por los miembros de la profesión de que se trate, convirtiéndose a partir de ese momento en las pautas de conducta que deben de seguir estos profesionales para poder cumplir de una manera adecuada con su trabajo de forma eficiente y dignificando la profesión.

Analizados distintos códigos éticos de diversos países, éstos tienen como principios universales la responsabilidad, la lealtad, la competencia, la equidad, la verdad y la franqueza. Si se observa el punto de vista de un colectivo, *un individuo se mide tanto por el nivel de los conocimientos adquiridos y demostrados, como por su forma de actuar de cara a sus clientes, sus competidores, el resto de colectivo y la sociedad en general* [2].

Precisamente son los códigos deontológicos los que unifican estos mínimos exigibles con el objetivo de definir qué es lo adecuado, lo honesto y lo debido en el ejercicio de la profesión correspondiente [3]. De hecho, estos códigos suelen aparecer en aquellos colectivos que tienen frente a la sociedad una alta responsabilidad social, como los médicos o los abogados, o como en el colectivo que estamos analizando, los ingenieros industriales, que asumen una responsabilidad cuando realizan cualquier tipo de trabajo profesional, ya que suelen estar relacionados con la seguridad y es necesario buscar un equilibrio entre la parte profesional y el ámbito moral de cada uno.

De todo lo expuesto anteriormente se puede afirmar que, si bien la ética se aplica al individuo, la deontología se aplica a los miembros de una profesión. De hecho, está comprobado que, si se trasladan los valores éticos nombrados anteriormente al ámbito empresarial, y se implanta la responsabilidad social corporativa en la empresa, se mejora la competitividad y la calidad. *Y se ha llegado a la conclusión que aquellas empresas que se preocupan por el cumplimiento de los códigos de conducta internos de la empresa son más competitivas, y sostenibles* [4].

Como se ha indicado previamente, los códigos éticos se elaboran por los propios colectivos profesionales y, en el caso de España, esta labor recae en los colegios profesionales que, además, con el fin de velar por su cumplimiento, se convierten en los custodios y encargados de hacer cumplir estas normas deontológicas. De hecho, los Códigos Deontológicos cumplen tres funciones [5]:

- Fijar y recoger criterios científicos y funcionales para el desarrollo adecuado de la profesión, convirtiéndola en una profesión más eficaz y operativa. Esta función la asumen los Colegios Profesionales defendiendo la profesión y evitando, previniendo y sancionando actitudes no correctas deontológicamente.
- Recapitular el ámbito moral de la profesión, determinando los comportamientos que se deben exigir a los profesionales de un colectivo determinado, a pesar de no estar legalmente recogidos y reflejarlos en códigos deontológicos sectoriales de cada profesión.
- La imposición de sanciones disciplinarias para aquellos profesionales que incumplan aquellos deberes y obligaciones reflejadas en los códigos deontológicos. Dichas sanciones recogen desde una mera reprimenda, un reproche o la expulsión temporal y definitiva del colectivo.

Inicialmente los códigos deontológicos regulaban determinados aspectos mínimos con el fin de generar confianza en el cliente y evitar prácticas deshonestas entre sus miembros, y acabaron regulando otro tipo de actuaciones relacionadas con la protección de datos, el blanqueo de capitales, el cobro de honorarios, la publicidad deshonestas y la competencia desleal [6]. *Se puede decir que los códigos deontológicos regulan aspectos concretos relacionados con la información previa, durante y al final de la relación comercial con el cliente* [7].

En España los Colegios Profesionales elaboran los códigos deontológicos, y están regulados en la Ley 2/1974, de 13 de febrero, sobre Colegios Profesionales, que los define como *Corporaciones de Derecho Público, amparadas por la Ley, y reconocidas por el Estado, con personalidad jurídica propia y plena capacidad para el cumplimiento de sus fines, y entre éstos destaca la ordenación del ejercicio de las profesiones.*

En el artículo 4 de la citada Ley se regula la creación, fusión, absorción, segregación, denominación y disolución de los Colegios Profesionales, estableciéndose en el apartado 3 que *dentro del ámbito territorial que venga señalado a cada Colegio no podrá constituirse otro de la misma profesión.* Eso implica que la creación de un colegio profesional con ámbito territorial circunscrito a un partido judicial, se crearán por Ley a petición de los interesados para profesión regulada en ámbito territorial en el que no exista con anterioridad otro igual o similar, debiendo promulgar dicha Ley el Gobierno Autonómico que corresponda.

Y dentro de sus funciones, según se describe en el Artículo 5.i) está *la ordenación en el ámbito de su competencia, la actividad profesional de los colegiados, velando por la ética y dignidad profesional y por el respeto debido a los derechos de los particulares y ejercer la facultad disciplinaria en el orden profesional y colegial.* Por otro lado, es importante destacar que, en España, no siempre se requiere la colegiación para el ejercicio de una determinada profesión, puesto que únicamente es requisito indispensable para el ejercicio de la profesión hallarse incorporado al colegio profesional correspondiente cuando así lo establezca una ley estatal, que en el caso de los ingenieros industriales y los ingenieros técnicos industriales sí que existe. En el caso español, se puede concluir que los colegios profesionales se estructuran, a nivel organizativo, en tres niveles:

1. Colegios constituidos para un solo distrito judicial. Hay que tener en cuenta que, según la normativa vigente, la incorporación al Colegio correspondiente según el domicilio profesional implica la autorización para ejercer la profesión en cualquier parte del territorio nacional.
2. Consejos Superiores de Colegios profesionales, que se crean por el legislador autonómico.
3. Consejos Generales, integrados por todos los Colegios de la misma profesión de ámbito inferior al nacional o, en su caso, de los Consejos Superiores de la misma. Tienen, a todos los efectos, la condición de Corporación de Derecho público, con personalidad jurídica propia y plena capacidad según la Ley. Normalmente el presidente del Consejo General es elegido entre y por todos los Decanos de España.

A nivel europeo, en la mayoría de los países está implantado el modelo en el que existe una única entidad de adscripción obligatoria, que está controlada exclusivamente por la propia profesión y con competencias para su registro. Es muy similar al modelo español, donde los colegios profesionales tienen la representación de la profesión.

Así, únicamente en los países del norte de Europa las profesiones suelen estar representadas únicamente por asociaciones privadas. En el resto, existe duplicidad de organizaciones, una sometida al Derecho público y otra al Derecho privado, o una única organización de origen legal. Solamente en cinco países nórdicos (Dinamarca, Estonia, Finlandia, Noruega y Suecia) y en algunos cantones suizos, no existe ni colegiación ni registro obligatorio.

Por el contrario, en el modelo anglosajón los colegios profesionales son autoridad competente para el reconocimiento de títulos europeos y también establecen los estándares de formación y de práctica profesional. Y también tienen competencias en lo que a control deontológico se refiere [8].

Trasladando lo anterior al caso concreto de la Ingeniería Industrial en España en lo que a colegios profesionales se refiere, existe un primer nivel, en el que está el Consejo General de Colegios de Ingenieros Industriales de España CGCOII [9] que obliga, en principio, a los Ingenieros Industriales de toda España, y cuyo código deontológico se convierte en norma de obligado cumplimiento para los profesionales colegiados. Ello se deriva de las potestades públicas que la normativa vigente ya indicada previamente y que se basa en lo estipulado en el Artículo 36 de la Constitución Española, que establece la obligatoriedad de que una Ley regule las peculiaridades propias del régimen jurídico de los colegios profesionales y del

ejercicio de las profesiones tituladas. En este código deontológico se tratan las obligaciones generales del Ingeniero Industrial:

- Independencia y honradez
- Protección de la sociedad y del medio ambiente
- Responsabilidad
- Veracidad
- Publicidad
- Aplicación del conocimiento
- Retribución y honorarios

Estas obligaciones son de necesario cumplimiento en el caso de los ingenieros colegiados y se refieren únicamente al ámbito profesional. Las mismas engloban actuaciones que se consideran éticas en cualquier ámbito de la vida de un individuo, ya que obligaciones como respetar el ordenamiento jurídico, no usar información privilegiada, no aceptar comisiones que alteren la independencia y objetividad del profesional, no dilatar intencionadamente los servicios profesionales ni mantener en su poder documentación como medida de presión, o no aceptar más encargos profesionales de lo que uno pueda atender, son acciones que se consideran éticas en cualquier ámbito.

Por otro lado, teniendo en cuenta el tipo de trabajo que realiza un ingeniero industrial y su impacto en lo que a la sociedad y el medio ambiente se refiere, es importante que estos profesionales antepongan la salud, el bienestar y la seguridad tanto de sus clientes como de la sociedad en general a la hora de realizar su trabajo, lo que también queda recogido en el citado código por su relevancia. Además de preservar el medio ambiente y hacer un uso sostenible de los recursos naturales.

Dentro de los puntos clave a para tener en cuenta por parte del ingeniero industrial es la posibilidad de que una negligencia pueda causar un perjuicio a su cliente o a terceros, siendo negligencia la falta de cuidado, aplicación y diligencia del profesional en la tarea encomendada. Por ello es recomendable y, en algunos casos exigible, tener suscrito un seguro de responsabilidad civil.

Otro punto importante que se recoge en el código deontológico son las incompatibilidades, con el objetivo de proteger de nuevo tanto al cliente, como a la sociedad como al propio profesional. En este caso se busca que la independencia del profesional no se ponga en entredicho, o que, en caso de compatibilizar la empresa pública con la privada, no se produzca ningún tipo de juego de intereses y se influya en un determinado sentido que altere la imparcialidad y el buen juicio del profesional en cuestión. En el mismo código deontológico se recogen las obligaciones que el profesional debe tener con:

- La clientela y el fondo de comercio
- La administración
- La empresa
- Los proveedores y suministradores
- Con el resto de los profesionales

Estas obligaciones están mayoritariamente relacionadas con una actitud servicial, con aportar su conocimiento y experiencia tanto en los trabajos que realiza como en su relación con el resto de los compañeros y la propia administración, con actuar de forma leal, honesta y respetuosa en cualquier situación, así como intentar ayudar en la medida de lo posible al resto de compañeros para conseguir eficacia en el trabajo. Para solventar los conflictos entre los propios profesionales de un ámbito o sector determinado, se insta a que sea a través de la mediación de los colegios profesionales, de forma que se busca llegar a un acuerdo entre las partes, evitando los tribunales.

Como peculiaridad en el caso de las profesiones técnicas y, en concreto, de los ingenieros industriales, destaca la venia profesional, que implica la obligación de un ingeniero que cesa de forma anticipada su relación con un cliente, de renunciar a su cargo e informar al profesional que vaya a continuar con el mismo de toda la información que requiera para continuar con su trabajo y no perjudicar al cliente. En lo que a

infracciones y sanciones se refiere, el código deriva a lo dispuesto en los Estatutos del colegio profesional al que pertenezca el ingeniero industrial en cuestión.

Dentro del segundo nivel se encuentran los colegios profesionales de los distintos ámbitos geográficos de España. Para poder analizar el contenido de los distintos códigos deontológicos con la intención de compararlos, se toma como ejemplo el Código Deontológico de los Ingenieros Industriales del Colegio de Madrid COIIM [10], que establece las obligaciones que los ingenieros deben adoptar para la mejora de la sociedad en el ejercicio de su profesión y tiene como objetivo dignificar la labor del ingeniero industrial. Las obligaciones generales de los ingenieros industriales que se recoge en el citado código son las siguientes:

- Independencia
- Integridad y honradez
- Protección de la sociedad y del medio ambiente
- Responsabilidad
- Veracidad
- Publicidad
- Divulgación del conocimiento
- Retribución y honorarios

Si lo comparamos con las obligaciones establecidas en el código deontológico del CGCOII, observamos que son las mismas obligaciones, lo que es coherente con el hecho de que el COIIM pertenece al CGCOII y, por lo tanto, lo regulado por el Consejo, como órgano superior, debe regir para los colegios profesionales que pertenecen al mismo. Este código, como el resto, recoge las normas que sirven de guía a los ingenieros industriales en el ejercicio de su profesión y en sus relaciones profesionales, e incorpora como novedad con respecto al código de conducta del CGCOII los principios de aplicación universal, que son la verdad, la honestidad, la lealtad, la equidad, la franqueza, la competencia y la responsabilidad.

De nuevo recoge las incompatibilidades en las que no puede recaer un ingeniero industrial en el ámbito de su profesión y vuelve a destacar la actitud de servicio y defensa de intereses del profesional hacia su cliente, así como la obligación de aportar los mayores grados de independencia, integridad, autonomía y capacidad técnica posible con el objetivo de que los resultados se maximicen.

El código vuelve a recoger las obligaciones que el profesional debe tener en sus relaciones con la clientela, la administración, la empresa, los proveedores y suministradores y el resto de los profesionales. En lo que respecta a las infracciones y sanciones, se establece que será la junta de gobierno del colegio la que vele por el cumplimiento y observancia de este código ético, recogiendo el tipo de infracciones y su régimen de sanciones, que se dividen en faltas leves, graves y muy graves.

En resumen, se puede afirmar que el código de conducta que rige a los colegiados del COIIM es prácticamente igual al del CGCOII, teniendo en cuenta que el COIIM es uno de los colegios profesionales que componen el CGCOII. Ahora bien, siguiendo con la misma línea de análisis y comparativa, si seleccionamos el código deontológico del Colegio de Ingenieros Industriales de Asturias COIIAS [11], cuyo ámbito de aplicación son sus colegiados, ingenieros industriales cuyo domicilio profesional único o principal esté en la Comunidad Autónoma de Asturias, observamos sutiles diferencias con respecto al código de conducta que rige el CGCOII.

En primer lugar, llama la atención que en su preámbulo destaca la labor de los ingenieros industriales, indicando que *son profesionales que tiene la capacidad de modificar el mundo actual y de resolver problemas técnicos y sociales que son esenciales, que conlleva una alta responsabilidad a la que los profesionales no pueden renunciar* [11].

En segundo lugar, incorpora como novedad una relación de principios fundamentales de las normas de conducta de los ingenieros industriales, tales como: actuar con responsabilidad y sabiduría, dedicación profesional, actuar con objetividad, rigor y claridad, promover un enfoque ético de la profesión a través de la integridad y reputación, o conocer, cumplir y hacer cumplir las normas deontológicas.

En tercer lugar, vuelve a recoger las obligaciones profesionales generales y las obligaciones que el profesional debe tener en sus relaciones de forma similar de los códigos deontológicos de CGCOII y el COIIM. Únicamente destaca, por su diferencia con el resto, el detalle con el que describe cómo deberían ser las relaciones profesionales, recogiendo deberes éticos como mantener respeto recíproco, abstenerse de emitir juicios lesivos, contribuir al intercambio de información con su experiencia y conocimientos.

Destaca el énfasis que pone en la necesidad de que el ingeniero Industrial tiene que ser consciente de realizar un esfuerzo permanente para mejorar sus conocimientos y capacidades que, junto con la integridad, marcará su desarrollo como un excelente profesional. Es importante porque destaca la necesidad de una formación continua por parte de los profesionales, y enumera una serie de compromisos que el ingeniero industrial debe seguir para conseguir este objetivo, entre ellos acciones tan lógicas como el hecho de elaborar trabajos profesionales únicamente en su área de conocimiento, no aceptar trabajos para lo que no está suficientemente cualificado, tener capacidad de autocrítica y disposición de aprender.

Por otro lado, a diferencia de los códigos deontológicos analizados, establece un procedimiento de actuación pormenorizado para sustituir a otro ingeniero en los casos de ingenieros proyectistas y directores de obra, todo ello para evitar un perjuicio al cliente final y asegurarse que la responsabilidad de los profesionales se encuentra absolutamente cubierta y repartida según las funciones asumidas por cada uno.

Por último, también como diferencia con respecto a los otros códigos analizados, especifica cómo debe actuar la comisión deontológica que tiene como misión valorar todo lo contemplado en la normativa y en el código de referencia, destacando que los colegiados, además de estar sujetos a la responsabilidad disciplinaria si se produce algún tipo de infracción de las normas deontológicas, deben prestar auxilio y colaboración a dicha comisión. Además, establece su composición, normas de funcionamiento y funciones, entre las que destaca intervenir mediante denuncia o de oficio, resolver las consultas que tengan que ver con la interpretación y aplicación del citado código.

Una vez analizados distintos códigos éticos en España, se procede a analizar el ámbito deontológico en el mundo anglosajón. En el caso del Reino Unido, por ejemplo, las instituciones que equivalen a los colegios profesionales en España tienen que estar autorizadas por el Engineering Council, órgano regulador de la Ingeniería en el país y es el encargado de establecer y mantener los estándares internacionales reconocidos de competencia profesional y ética que rigen la concesión y retención de los títulos de ingeniería.

Como ejemplo de código deontológico del modelo anglosajón está el perteneciente al Institute of Industrial Engineers IISE [12], Asociación Mundial de Profesionales de la Productividad y la Eficiencia especializados en Ingeniería Industrial, atención médica, ergonomía y otras profesiones relacionadas. En dicha asociación se unifican varios campos para avanzar en la profesión de la ingeniería a través de la creación de redes, la capacitación y el intercambio de conocimientos.

El Código de Ética de la Comisión de Acreditación de Ingeniería y Tecnología es un documento reducido que está dividido en dos partes: principios y reglas fundamentales. Al especificar los principios fundamentales, se basa en que los ingenieros deben mantener y promover el honor, la integridad y la dignidad de la profesión de ingeniería de diferentes formas, como usar sus conocimientos y habilidades para mejorar el bienestar de las personas, ser imparciales y honestos, aumentar la competencia y el prestigio de la ingeniería y apoyar las técnicas de sus disciplinas. La segunda parte se refiere a las siete reglas fundamentales que debe regir la profesión:

- El principio rector debe ser la salud, seguridad y bienestar del público
- Hacer trabajos profesionales solo en las áreas de su competencia
- Realizar las declaraciones públicas de forma veraz y objetiva
- Evitar conflictos de interés y tratar los asuntos de forma confidencial
- No realizar competencia desleal y basar su reputación profesional en el mérito
- Asociarse con profesionales que tengan buena reputación
- Mantener el desarrollo profesional y, a su vez, ofrecer a otros ingenieros oportunidades para que se puedan desarrollar

Si comparamos este código anglosajón con los códigos deontológicos de España, lo primero que destaca es que el objetivo en todos los casos es la dignificación de la profesión de ingeniero, si bien la extensión de los mismos varía de forma considerable, ya que el anglosajón se caracteriza por su brevedad en comparación con los españoles. Respecto a los principios fundamentales, se observa que son los mismos que están presentes en los códigos españoles, ya que la imparcialidad, la honestidad o la responsabilidad están presentes en todos los códigos, lo que demuestra su universalidad.

Por otro lado, las siete reglas fundamentales que deben regir la profesión aparecen recogidas, de diversa forma, en los códigos deontológicos españoles. Si los analizamos, en todos los códigos se indica que la profesión tiene que estar regida y anteponer la salud, el bienestar y la seguridad de sus clientes y de la sociedad cuando ejerce su profesión. La obligación de que únicamente realicen trabajos de su competencia de nuevo aparece recogida en todos, lo mismo que la veracidad y objetividad como principios, que en el caso de los españoles se repiten cuando especifican cómo deben ser las relaciones con los distintos agentes: la administración, el resto de compañeros, el cliente, la empresa o los proveedores. Mantener la confidencialidad, no hacer competencia desleal y evitar conflictos de interés son obligaciones que de nuevo se recogen en todos los códigos, dejando patente su importancia al ejercitar la profesión.

El desarrollo profesional es clave e importante en el código del IISE, destacando además la importancia de ayudar a otros compañeros para que la profesión mejore. Es similar a la importancia que le da el código deontológico del COIIAS, en el que se pone de manifiesto la necesidad de mejorar sus conocimientos y capacidades con el fin de conseguir la excelencia. Por lo tanto, se puede concluir que lo recogido en el código anglosajón está igualmente regulado en los códigos españoles, si bien estos últimos son más extensos y además, regulan el órgano que debe velar por su cumplimiento. Tampoco se recogen las infracciones y sanciones por incumplimiento de estas normas.

En Latinoamérica, existen también múltiples ejemplos de códigos deontológicos aplicables a los ingenieros industriales. Se procede a analizar el Código de Ética Profesional del Colegio Nacional de Ingenieros Industriales de México y el Código de Ética del Colegio de Ingenieros de Chile AG con el fin de compararlos con los ejemplos expuestos anteriormente de códigos españoles y anglosajones. El Código de Ética Profesional del Colegio Nacional de Ingenieros Industriales de México [13] tiene como fin *orientar la conducta de los Ingenieros Industriales de México en sus relaciones con las instituciones, socios, ciudadanía, colegas, etc., aplicándolo para cualquier actividad profesional [13]*.

En el mismo se especifica que su función está encaminada a sensibilizar al ingeniero industrial para que tenga moralidad, honestidad y legitimidad en sus relaciones, siendo deseable que la ética prevalezca tanto en los conocimientos como en las habilidades profesionales. De nuevo únicamente es aplicable a los profesionales que pertenecen a dicho Colegio, de quienes se busca que tengan una moral elevada y que dentro de actividad profesional observen la legalidad vigente. Destaca que se subraya que el cumplimiento de la ética debe ser por autoconvencimiento, puesto que la misma depende exclusivamente de la voluntad de quien ha decidido cumplirlo. El profesional se adhiere a un determinado código ético por el valor que se le atribuye y por el bien cultural y social que protege con el mismo.

El código tiene la siguiente estructura: introducción, marco conceptual, generales, de los deberes del ingeniero industrial, de los deberes para con sus colegas, de los deberes para con las personas, de los deberes para con su profesión, de los deberes para con la sociedad. En lo que respecta a los deberes del ingeniero industrial, se enumeran los que se consideran necesarios para ejercitar la profesión, tales como ofrecer sus conocimientos y recursos técnicos a la sociedad, actuar *con lealtad, respeto, honestidad, formalidad, sinceridad, buena fe, dignidad, justicia y honradez* [13], responsabilizarse de aquellos trabajos para los que tenga capacidad, mantener la confidencialidad, responder por los trabajos realizados, respetar los derechos humanos, trabajar con independencia, ser imparcial a la hora de emitir una opinión o juicio profesional, entregar los trabajos puntualmente y evaluar los trabajos profesionales desde la crítica y la objetividad.

Al exponer los deberes para con sus colegas, destaca el dar crédito a sus colegas en la intervención de sus asuntos, mantener una relación de respeto y colaboración con ellos en lo que respecta a la opinión de sus

colegas, intervenir a su favor en caso de injusticia y en caso de colaboración, repartir de forma justa y equitativa lo obtenido.

Al exponer los deberes para con las personas se indica que debe establecer con ellas de forma objetiva una relación humana de compromiso personal y profesional, ser leal, honesto y veraz con su cliente, salvaguardando sus intereses e informándole de los posibles riesgos existentes, cobrar honorarios de forma proporcionada con el trabajo realizado, renunciar a sus honorarios si el trabajo realizado no se elaboró según lo acordado o si se ha incurrido en negligencia, incumplimiento o error profesional, reconocer su mala actuación ante su cliente en caso de ser así y advertirle de sus consecuencias y realizar los cambios pertinentes si se ha realizado un servicio ineficiente.

En los deberes para con su profesión indica que el profesional tiene que estar actualizado en lo que a avances tecnológicos y científicos en su materia se refiere, tiene el deber de compartir tanto sus conocimientos y como su experiencia con los estudiantes y egresados de su misma profesión, dignificar su profesión mediante un buen desempeño profesional, investigar con el objetivo de contribuir al desarrollo de la profesión y alabar siempre el prestigio de la ingeniería industrial.

Por último, se establecen los deberes de los ingenieros industriales para con la sociedad, estableciendo la obligación de prestar un servicio profesional con conciencia social y por convicción solidaria, respetar las costumbres, tradiciones y cultura mexicana, buscar el equilibrio entre el medio ambiente y la conservación de los recursos o desempeñar la profesión allí donde pueda contribuir más al desarrollo nacional con su sabiduría. Destaca el final del código ético un juramento que por su importancia y singularidad se procede a reproducir [13]:

Protesto utilizar todos mis conocimientos, experiencia y compromiso para lograr una productividad al servicio del desarrollo de los seres humanos y en armonía con la preservación de la naturaleza. Defender con la verdad y fortaleza los derechos de las personas e instituciones para enaltecer con mis actos la profesión a la cual pertenezco. De faltar a la conciencia ética y a un comportamiento coherente con ella como profesionalista, que se haga de mi conocimiento y que la comunidad científica y la sociedad, me lo reclamen.

Por su parte, el Código de Ética del Colegio de Ingenieros de Chile A.G. [14] recoge un conjunto de normas de obligado cumplimiento para sus asociados y que regula la conducta de estos dentro del ejercicio de la profesión. Tiene como misión ser un referente a la hora de analizar, por parte de cada ingeniero, una determinada situación, sin que en ningún caso supla la responsabilidad personal de cada uno.

Es importante el hecho de que específicamente recoge que *sus disposiciones se presumen conocidas por todos los colegiados, y que frente a cualquier conflicto que encierre algún tipo de cuestionamiento ético, los colegiados no podrán alegar ignorancia de las mismas en caso de trasgresión o cuestionamiento* [14]. Por ello, cualquier hecho que constituya una falta o cuestionamiento a la ética y se conozca por el colegio ya sea vía de oficio o vía denuncia, será investigado y si establece y resuelve por parte del Tribunal de Ética del Colegio que se ha producido, puede dar lugar a la aplicación de sanciones tanto de forma como de fondo, según la normativa aplicable.

Este código tiene la siguiente estructura: fundamento, código de ética, título I: de las normas generales (normas básicas), título II: del ejercicio profesional, título III: de las relaciones entre profesionales, título IV: de las relaciones con los mandantes, título V: de las relaciones con la comunidad, título VI: de las relaciones con el Colegio.

En el apartado referente al código de ética se enumeran una serie de puntos que deben ser observados por los ingenieros frente a todos, y se indica que deben mantener una conducta profesional que sea ética e irreprochable, velar por una correcta ejecución técnica y moral de los trabajos profesionales, proteger la salud y el bienestar público y cuidar de la seguridad de las personas, todo ello bajo los principios del desarrollo sustentable y de la protección del medio ambiente, desempeñar su trabajo únicamente en aquellas áreas de su competencia para las que tenga un conocimiento adecuado, realizar declaraciones veraces y objetivas, evitar conflictos de intereses, actuar siempre de forma leal, ética, honorable y con equidad y buena fe, no competir de mala fe con sus colegas y no discriminar a nadie.

En lo que respecta a las normas generales y básicas, se incide en que los ingenieros deben crear las condiciones para que las políticas nacionales fomenten la investigación, el desarrollo y la transferencia de tecnología, así como promover el aprendizaje de los principios éticos y normas de conducta, cuidar y promover el prestigio del colegio, mantener su independencia de criterio y autonomía, representar a sus clientes y empleadores y no aprovecharse de forma indebida de su cargo.

Sobre cómo actuar en el ejercicio profesional, se indica que se ejercerá la profesión solo en las áreas en las que sean competentes, tendrán en cuenta el impacto social y ambiental de sus decisiones profesionales, realizar informes y declaraciones objetivos y veraces, informar sobre los riesgos a la seguridad, salud y bienestar de la comunidad, no utilizar los trabajos profesionales de otro sin su autorización, ser responsables de su trabajo, no simular participar en procesos de licitación, no beneficiarse de su cargo para conseguir trabajos profesionales, no aceptar encargos sujetos a resultados, no falsear datos sobre sus antecedentes profesionales, no utilizar instalaciones y bienes de sus empleadores sin autorización, no involucrarse voluntariamente en prácticas profesionales fraudulentas, deshonestas o inmorales, en su actuación como perito exponer únicamente su opinión en lo que esté fundada en un conocimiento de los hechos y basado en su competencia técnica, y si trabajan con alumnos, cuidar que sus trabajos sean revisados y validados de forma correcta.

En el área de las relaciones entre profesionales, se recoge que no deben ceder su nombre a favor de quien no sea ingeniero, responsabilizarse y firmar aquellos trabajos realizados por otros ingenieros que estén bajo su responsabilidad y siempre que se hayan revisado y verificado estos trabajos, guardar corrección en la relación con sus colegas, no ocupar el lugar de otro ingeniero que haya sido ya nombrado para un trabajo determinado, denunciar ante el Tribunal de Ética correspondiente las infracciones al Código de Ética cometidas por otro colega.

En lo que respecta a las relaciones con los mandantes, se indica que los ingenieros deben comunicar sobre su trabajo a sus mandantes, empleadores o superiores jerárquicos con el fin de que conozcan el alcance de los estudios de ingeniería involucrados y de las consecuencias sobre la seguridad, salud y bienestar público y el medioambiente que se podría generar, y mantener lealtad con ellos, manteniendo la confidencialidad, evitando cualquier conflicto de interés y trabajando siempre en el mejor interés de su mandante y poder ofrecerle el mejor servicio posible, realizando el trabajo independientemente de todo interés que no sea el de su mandante, y tener derecho a ejercer su derecho al secreto profesional.

En lo referente a las relaciones con la comunidad, se indica que el ingeniero debe actuar sabiendo que su responsabilidad y buen juicio depende la seguridad y bienestar de las personas, así como ejercer su profesión teniendo en cuenta la salubridad, el bienestar y la seguridad de la comunidad.

Por último, trata las relaciones con el Colegio, indicando que tienen que informar a la autoridad del Colegio sobre quienes ejerzan funciones de Ingeniero sin estar habilitado para ello, no participar en habilitaciones profesionales que lesionen el prestigio y calidad de los ingenieros, obligación de observar las disposiciones generales o particulares de los estatutos del Colegio de Ingenieros de Chile AG, así como denunciar ante el Colegio cualquier actividad contraria a este Código y que esté debidamente comprobada.

Se hace referencia expresa a que, siendo faltas a la ética aquellas conductas que vulneren las relaciones del ingeniero con el Colegio, no acatar los acuerdos y resoluciones del Consejo Nacional, o de los Tribunales de Ética de la Orden, o realizar acciones que dañen el prestigio del Colegio destacan sobre el resto.

3. CONCLUSIONES.

Si se analizan tanto el Código de Ética Profesional del Colegio Nacional de Ingenieros Industriales de México como el Código de Ética del Colegio de Ingenieros de Chile AG se observa que ambos códigos son más parecidos a los códigos éticos españoles analizados que al anglosajón. Son códigos más extensos y que recogen, de forma más detallada y minuciosa, las responsabilidades de los ingenieros industriales en lo que respecta a todo tipo de relaciones: con el resto de la sociedad, con otros ingenieros, con sus clientes, con la administración,

Los valores a proteger en todos los códigos analizados son los mismos: la honestidad, la veracidad, la lealtad, la buena fe, la equidad, la integridad, la independencia, la buena fe, la justicia y la responsabilidad.

Para ello, existen una serie de obligaciones que se repiten en todos los códigos a nivel universal, y que persiguen mejorar el nivel ético del ingeniero industrial y conseguir la excelencia profesional.

Las obligaciones que están presentes en todos los códigos analizados son:

- Formación continua con el objetivo de mejorar sus conocimientos y capacidades
- No aceptar trabajos para los que el ingeniero no está suficientemente cualificado
- Realizar declaraciones veraces y objetivas
- No realizar competencia desleal
- Evitar conflictos de interés
- Responder por los trabajos realizados
- Que todo lo realizado debe tener presente la salud, la seguridad y el bienestar del público en general

Si se analizan y comparan los códigos españoles y los latinoamericanos, dejando al margen el código anglosajón, que es menos extenso y sucinto, existen otra serie de obligaciones que también son comunes:

- Denunciar al Tribunal Ético correspondiente aquellas conductas de las que se tengan noticia y que estén en contra del código de referencia
- Entregar los trabajos de forma puntual
- Evaluar los trabajos profesionales desde la crítica y la objetividad
- Mantener una relación de respeto y colaboración con los compañeros de profesión
- Colaborar entre profesionales
- Cobrar honorarios de forma proporcionada con el trabajo realizado
- Salvaguardar los intereses del cliente e informarle de los riesgos existentes
- Reconocer su mala actuación y actuar en consecuencia
- Renunciar a los honorarios en caso de negligencia, incumplimiento o error profesional

Una de las diferencias llamativas entre los códigos españoles y los latinoamericanos se refiere es que en los españoles se recoge de forma expresa cómo debe actuar el ingeniero a la hora de transmitir la responsabilidad, explicando cómo actuar en caso de cese anticipado en la realización de un trabajo profesional y su obligación de transmitir cualquier dato o circunstancia que haya obtenido y que sea necesario para que el otro ingeniero continúe con el trabajo, así como manifestar por escrito la renuncia con el fin de aclarar, entre otras cosas, aspectos relacionados con la responsabilidad civil profesional.

Además, es importante el matiz que incorpora el Código de Ética Profesional del Colegio Nacional de Ingenieros Industriales de México, donde se pone de manifiesto que la ética debe de cumplirse por convencimiento personal, ya que depende exclusivamente de la voluntad del ingeniero el hecho de ponerlo en práctica.

Una vez comparados los distintos códigos éticos elegidos como ejemplos de diferentes áreas geográficas, es importante establecer por qué es importante aplicar la deontología profesional en la Ingeniería Industrial.

Cualquier decisión que un profesional adopta en el ejercicio de su profesión tiene un impacto tanto en él mismo, como en las personas que le rodea, en sus colegas de profesión o en sus compañeros de trabajo, ya sean sus subordinados o sus superiores. Por eso, analizar sus decisiones profesionales es muy importante, puesto que tomar un camino u otro conlleva, en numerosas ocasiones, seguir el camino correcto, de forma ética y sin dañar a nadie [15].

Cualquier profesional debe conocer las consecuencias que su actividad profesional puede causar a las partes afectadas por su actuación, ya que dentro del aprendizaje recibido, se incluye una formación específica que les permite obtener y analizar la información necesaria para poder distinguir, en el ámbito de su profesión, qué actos son éticos y cuáles no, si bien es cierto que los valores éticos evolucionan con el

paso del tiempo, también en la práctica de la Ingeniería, y esta evolución debe ser recogida en la enseñanza de la Ingeniería.

Está comprobado por un Estudio de la Universidad de Alicante en 2014 que la propia evolución de la sociedad está demandando, cada vez más, nuevas y mejores acciones profesionales [16]. Y en dicho estudio se concluye que los profesionales del futuro necesitan saber tratar los cambios de una forma concisa y rápida, colaborar con otros profesionales, integrar distintos puntos de vista, saber desenvolverse en entornos tecnológicos y estar preparados para saber adaptarse a unas condiciones del entorno que son cambiantes y con una alta incertidumbre.

La actividad dentro del ámbito de la Ingeniería supone estar a la vanguardia del progreso tecnológico, lo que lleva a nuevos retos dentro de la ética profesional, como actualmente pueden ser los retos energéticos en contraposición a los retos que supone el cambio climático.

La profesión de Ingeniero integra, a su vez, numerosas disciplinas y especialidades, ya que poseen una formación básica con el fin de resolver los problemas que se presenten en el ejercicio de su profesión con independencia y creatividad.

La ética en ingeniería se define como *el íntimo convencimiento del cumplimiento de todas las actividades intelectuales como prácticas necesarias en la realización del ejercicio profesional para lograr el fin encomendado, conjurando así la activación del riesgo social que comporta una eventual incorrecta o inidónea práctica profesional* [17].

El desarrollo tecnológico y la innovación implican responsabilidades morales cada vez mayores. Ello supone que los ingenieros tienen que tomar decisiones que afectan a la sociedad en general. Por eso, una ausencia de ética o de cultura ética en los ingenieros afecta a su trabajo, lo que le rodea y su desarrollo profesional.

Por todo ello, los ingenieros industriales deben cumplir, como se indica en todos los códigos éticos analizados previamente, con una serie de derechos y de obligaciones en la propia comunidad, sociedad u organización a la que pertenecen, y también con las leyes y resto de normas, con el objetivo de realizar su trabajo de la manera más eficiente posible y dignificando la labor del ingeniero industrial.

Ahora bien, es importante recordar que, como se ha dicho previamente, los valores éticos evolucionan con el paso del tiempo y estos cambios deberían de incorporarse en los diferentes códigos éticos de una forma ágil, de forma que se pueda responder a los cambios que se producen en la sociedad de la mejor manera posible.

REFERENCIAS

- [1] Schwartz M. (2001). The Nature of the Relationship between Corporate Codes or Ethics and Behaviour. *Journal of Business Ethics* 247-262.
- [2] Bellizzi T. (2005). Disciplining top – performing unethical salespeople: Examining the moderating effects of ethical seriousness and consequences. *Psychology & Marketing* 181-201.
- [3] Lugli E. (2009). The codes of ethics of S&P / MIB Italian companies: An investigation. *Journal of Business Ethics* 33-45.
- [4] Lere J. (2007). Changing Behavior by Improving Codes of Ethics. *American Journal* 7-18.
- [5] Múquiz G. (2016). La función Deontológica de las Organizaciones Colegiales y su Impacto Económico. *Revista Unión Profesional*.
- [6] Erwin P. (2011). Corporate Codes of Conduct: The Effects of Code Content and Quality on Ethical. *Journal of Business Ethics* 535-548.
- [7] Kaptein M. (2015). The Effectiveness of Ethics Programs: The Role of Scope, Composition and Sequence. *Journal of Business Ethics* 415-431.
- [8] Delgado R. et al. (2020). Códigos deontológicos: El rol de los colegios profesionales y las profesiones reguladas. *Revista Espacios* 231-249.
- [9] CGCOII (2021). Código Deontológico del Consejo General de Colegios de Ingenieros Industriales de España. Recuperado: <https://ingenierosindustriales.es/que-es-el-consejo-general/portal-de-transparencia/codigo-deontologico-de-los-ingenieros-industriales/>

- [10] COIIM (2021). Código Deontológico de los Ingenieros Industriales de Madrid. Recuperado: http://www.coiim.es/Documentos%20Oficiales/Codigo_Deontologico.pdf
- [11] COIIAS. (2021). Código Deontológico del Colegio de Ingenieros Industriales de Asturias. Recuperado: <https://www.coiias.es/inicio>
- [12] IISE. (2021). Código Deontológico del Institute of Industrial Engineers. Recuperado: <https://www.iise.org/Details.aspx?id=299>
- [13] Código Deontológico del Colegio Nacional de Ingenieros Industriales de México (2021). Recuperado: <https://conaii.org.mx/codigo-de-etica/>
- [14] Código de Ética del Colegio de Ingenieros de Chile AG. (2021). Recuperado: <https://www.ingenieros.cl/codigo-de-etica/>
- [15] Rubio D. (2020). Percepciones deontológicas en la práctica profesional en el campo de la ingeniería. Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana.
- [16] Universidad de Alicante. (2014). XII Jornadas de Redes de Investigación en Docencia Universitaria. Instituto de Ciencias de la Educación.
- [17] Nemeth J. (2016). Procesos éticos disciplinarios. Press.

Condiciones de uso y aprovechamiento de las nuevas tecnologías en organizaciones de economía solidaria

Jorge Andrés González Díaz¹
Sandra Milena Malavera Pineda²
Juan Santiago Calle Piedrahita³
Universidad Católica Luis Amigó
Colombia

Las organizaciones de economía social solidaria enfocan sus esfuerzos para atender los aspectos sociales de la comunidad, por lo que el objetivo de esta investigación se centró en identificar las condiciones de uso que hacen de nuevas tecnologías. La metodología fue encuesta enviada a los gerentes de estas organizaciones en Colombia, según las bases de datos de la superintendencia de economía social y solidaria durante el primer semestre del 2022. El principal hallazgo es que las organizaciones sociales confunden los términos de innovación y tecnologías; además, que en un 83% implementan tecnología asociada a la creación de página web y sistemas CRM. En conclusión, las organizaciones sociales enfrentan un nuevo desafío de entender estos conceptos y están atrasadas en la implementación de nuevas tecnologías.

¹ Estudiante de Administración de Empresas.

Contacto: jorge.gonzalezdi@amigo.edu.co

² Administradora de Empresas y Magíster en Dirección de marketing.

Contacto: sandra.malaverapi@amigo.edu.co

³ Administrador de Negocios y Doctor en Ingeniería.

Contacto: juan.callepi@amigo.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El hombre comienza a utilizar la tecnología para transformar recursos naturales, lo cual, a través del tiempo ilustran cambios que generan resistencia y efectos adversos mientras se asimilan y se masifican. La literatura muestra que la tecnología aporta al desarrollo de la organización [1], acepta cambios organizacionales [2], promueve el progreso social [3], analiza el impacto ambiental favorable [4], genera adaptabilidad a los cambios del entorno [5] y permite el intercambio de información [6] en organizaciones económicas. Es decir, la tecnología se enfoca en factores positivos hacia el desarrollo integral de la organización, pero los estudios no identifican el uso de la tecnología en el desarrollo de organizaciones de economía social solidarias en Colombia [7-9].

La creciente demanda de los bienes y servicios, los desarrollos tecnológicos y la globalización de los mercados están cambiando el entorno de las organizaciones de economía solidaria [10-12]. Lo anterior, expone la necesidad de incorporar nuevas tecnologías de la información y de telecomunicaciones; es decir, lograr el beneficio la adaptación a las organizaciones económicas y sociales. A su vez, promueve la digitalización de los servicios para eliminar distancias de actividades; también, incorporar la economía y el mercado, de forma tal que la competencia no conozca fronteras; por otra parte, la incidencia sobre los puestos de trabajo, la estructura ocupacional, los procesos, la gestión administrativa y las relaciones de la organización con sus grupos de interés permiten la adaptabilidad al cambio global.

2. MARCO CONCEPTUAL

Al incorporar tecnología en las organizaciones promueven en las PYMES a promover estructuras al asesoramiento y coordinación para reducir el riesgo y establecer criterios de selección y análisis de impacto. Ante esta perspectiva, surge el reto de una mayor sensibilización en la búsqueda de soluciones apropiadas de incorporación de las nuevas tecnologías; además, deben ser ajustadas a las necesidades propias de cada organización para la creación de valor.

Medir la tecnología contribuye al ahorro de tiempo que promueven la configuración de ventajas competitivas. Además, las organizaciones plantean nuevos contactos para formular las necesidades de tecnologías para impactar el crecimiento de ella. Es decir, debe tener una visión amplia de las necesidades para aclarar la real necesidad externa y no solo centrarse en las necesidades internas.

2.1 TIC en economía solidaria

Estudios recientes sugieren que las Tecnologías de la Información y la Comunicación TIC pueden ofrecer amplias oportunidades a las organizaciones, tales como: facilitar la expansión del abanico de productos, mejora del servicio al cliente, la adaptación y respuesta a la demanda, la mejora de las relaciones con proveedores y clientes. Las empresas que constituyen la economía social o tercer sector también están abiertas a estas posibilidades. Sin embargo, los trabajos empíricos existentes al respecto para las organizaciones de la economía social son todavía escasos. Con lo anterior, el objetivo de la investigación se centra en identificar las condiciones de uso de nuevas tecnologías en las organizaciones de economía social y solidarias de Colombia.

A través de un trabajo de campo mediante entrevistas personales a responsables de 515 empresas andaluzas concluyó que el posicionamiento de las empresas frente a la incorporación de las NTIC estaba ligado a factores como el tamaño, la localización, el sector de actividad y el momento de su primer contacto con la informática [13]. El posicionamiento respecto a las NTIC condicionaba su compromiso con la innovación tanto en el momento actual como en el futuro y afectaba a sus expectativas sobre los procesos de internacionalización.

Igualmente, [14], presentan un análisis descriptivo, en el que recogieron las principales características del colectivo de empresas cooperativas, observaron que predominaban las cooperativas maduras de más de 10 años de antigüedad, con reducido tamaño y con niveles de adopción de las TIC inferiores a los alcanzados por otras empresas, lo que les permitió márgenes de mejora. El estudio confirmó por un lado la importancia

de estas tecnologías en los resultados de las organizaciones; por otro lado, similar contribución de las cooperativas frente al resto de formas jurídicas al no reflejar diferencias significativas en el coeficiente que recoge la incidencia de dicha forma organizativa en la eficiencia.

En cuanto al marco legal de las nuevas tecnologías a nivel internacional es amplio, pero confuso, ya que involucra diferentes naciones con regulaciones propias, antecedentes legales que muestran un desarrollo lento donde el panorama del fraude está presente y es muy difícil de regular. El caso de las TIC en Colombia la Ley 1341 del 30 de julio de 2009 es una de las muestras del esfuerzo del gobierno colombiano por brindar un marco normativo para el desarrollo del sector de Tecnologías de Información y Comunicaciones. Esta Ley promueve *el acceso y uso de las TIC a través de su masificación, garantiza la libre competencia, el uso eficiente de la infraestructura y el espectro, y en especial, fortalece la protección de los derechos de los usuarios* [16].

La Constitución Política de Colombia de 1991 promueve el uso activo de las TIC como herramienta para reducir las brechas económicas, sociales y digitales en materia de soluciones informáticas representada en la proclamación de los principios de justicia, equidad, educación, salud, cultura y transparencia [15]. La Ley 715 de 2001 brindada a la oportunidad de trascender desde un sector con baja cantidad y calidad de información a un sector con un conjunto completo de información pertinente, oportuna y de calidad en diferentes aspectos relevantes para la gestión de cada nivel en el sector [16].

Ahora bien, al analizar los efectos de la normatividad en relación de promover la aplicación y el uso de tecnología se puede decir que:

El avance tecnológico ha modificado de forma profunda los espacios productivos y de vida en nuestras sociedades, y lo sigue haciendo a velocidades cada vez mayores... Sin ánimo de ser exhaustivos lo que queremos significar es que el avance tecnológico puede cambiar las condiciones de nuestro negocio o ámbito de acción. Algunos cambios pueden ser en las formas de producción, diseño, difusión, etc. pero otros pueden ser más profundos y pueden afectar a nuestra rama de actividad de forma directa. No se trata de ser apocalípticos, pero sí de reconocer los cambios que acontecen. Anticipar las direcciones del desarrollo, prever los puestos de trabajo que serán requeridos y preparar los distintos perfiles laborales para que gestionen los sistemas productivos del futuro, son algunas de las tareas imprescindibles para el corto y el mediano plazo [17].

Las organizaciones tienen que contextualizar el desarrollo de nuevas tecnologías que impacten positivamente en el uso de esta. Además, se debe perfilar las necesidades de la organización con una visión interna y externa para unificar los criterios y características de requerimiento de tecnología.

2.2 Tecnologías de la Información y la Comunicación

La historia de las TIC en la época moderna empieza en la década de los 70 del siglo pasado. Este tuvo un impacto favorable de facilitar la comunicación y acceso de información compartida. El autor afirmó que el proceso acelerado en el uso de las TIC está influyendo en la vida de los seres humanos de tal forma que en muchos casos reemplaza las decisiones humanas por una estadística, un dato o una tendencia [18]. Las TIC son una herramienta de trabajo que puede facilitar el ejercicio en todos los campos del aprendizaje. La información es importante basada en una regulación que se usen como herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Sin embargo, se debe evitar que se pierda el elemento humano al trasponer la tecnología. A su vez, [19] ofrece una breve reflexión sobre la tecnología, la información, la comunicación y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en el cual demostraron los beneficios y dificultades de incorporar tecnología que reduzca la brecha de la sociedad digital.

Las TIC están integrados casi en la totalidad de los aspectos sociales, educativos y organizacionales, no se concibe un mundo moderno sin las TIC. La necesidad de integrar nuevos elementos y nuevas herramientas a los procesos organizacionales, en áreas consideradas críticas por el imperativo de la ética y de la calidad colocan a las TIC como uno de los mecanismos potenciales más eficientes en términos de contextos y de tiempo que permiten un mejor resultado y ayudan en la tarea de buscar oportunidades de mejora en los procesos internos de cada organización de economía social.

2.3 Economía social

Históricamente, el concepto de economía social ha sido objeto de análisis y discusión en diferentes ámbitos de estudio debido al creciente interés que despierta el tema. Es decir, los entes privados y públicos acercan el conocimiento al divulgar el uso de las tecnologías en el entorno de la organización. A su vez, deben analizar los aspectos sociales que afecta la tecnología. En otras palabras, se debe aclarar los mecanismos de participación en la organización y en la construcción ciudadana.

En el caso colombiano, son muy pocos los escritos reconocidos que se refieran específicamente al tema de una manera amplia y profunda. La Unidad Administrativa Especial de Organizaciones Solidarias [20] define lo que denomina las organizaciones solidarias de desarrollo OSD como:

Un sector constituido por el conjunto de organizaciones de emprendimiento, de carácter asociativo y solidario, legalmente constituidas, sin ánimo de lucro, administradas democráticamente, autogestionadas y voluntarias que a través de sus acciones buscan el bien común, satisfacer las necesidades humanas, y fundan su quehacer en la solidaridad y el trabajo colectivo [20].

La economía social es una fuente para integrar la sociedad con lo económico pero basado en el trabajo colaborativo para mantener unidas a las comunidades. El ambiente social y económico se recuenta en el conjunto de organizaciones que aportan al principio de participación democrática, pero con la influencia social sobre lo económico. La economía social busca una transformación social. Es decir, se establece un impacto social por encima del lucro de la organización; pero al mismo tiempo involucra los valores corporativos de solidaridad, equidad y sostenibilidad. Además, incluye los sectores más desfavorecidos.

La economía social y solidaria se enfocan en el referente de organizaciones como: cooperativas, mutuales sociales, asociaciones, fundaciones y empresas sociales que aportan en bienes y servicios hacia la comunidad para cubrir sus necesidades mutuamente con la motivación solidaria. Las organizaciones cooperan y profundizan en el hacer social, pero con un enfoque no lucrativo, pero no se deja a un lado el lucro directamente, sino que este se reinvierte en la organización para impulsar nuevos proyectos sociales.

La economía social se identifica con un proceso social que involucra la sociedad en el fin de ser mejores seres humanos a partir de la economía. Es decir, ayudar al prójimo a superarse para que, en su conjunto, la sociedad, se beneficie del ser, pero a su vez ayude al medio ambiente y genere utilidades que no se reparten entre los asociados, sino en su propia organización para efectos de ayudar a otras comunidades. El fin de la economía social es transformar la producción, distribución y comercialización que aporte a una transformación social.

2.4 Cooperativas

Según la Alianza Cooperativa Internacional ICA definió a las cooperativas como *asociación autónoma de personas que se han unido de forma voluntaria para satisfacer sus necesidades y aspiraciones económicas, sociales y culturales en común mediante una empresa de propiedad conjunta y democráticamente controlada* [21- 22]. Éstas, son organizaciones regidas especialmente por un carácter social en las que la confianza y la cooperación son pilares básicos y están basadas en el capital social. En otras palabras:

el capital social es entendido como una de las principales características de estas organizaciones en comparación con las empresas capitalistas, ya que las redes sociales sostenidas en normas de reciprocidad y la confianza se erigen como las bases fundamentales de las cooperativas [23].

Para su debido funcionamiento, las cooperativas aplican normas de orientación para la adopción de los principios cooperativos que les aportan herramientas para la puesta en marcha de valores y configurar la plataforma estratégica en general; es decir, los valores del cooperativismo son: 1) adhesión voluntaria y abierta, 2) gestión democrática por parte de los socios, 3) participación económica de los socios, 4) autonomía e independencia, 5) educación, formación e información, 6) cooperación entre cooperativas, y 7) interés por la comunidad [22].

Es así como estos principios rectores, los valores y las prácticas les dan mayor importancia a las personas que al capital o su participación económica; además teniendo en cuenta su naturaleza de carácter orientado

a lo humano, sus estructuras organizacionales diversas, democráticas e incluyentes favorecen para que se construyan lazos tanto en el interior de la cooperativa como por fuera de ella.

3. MÉTODO

La presente investigación se realizó bajo el enfoque cuantitativo que permitió establecer elementos de medición claros, los cuales se obtuvieron con un cuestionario dirigido a 534 gerentes entre cooperativas, fondos de empleados y asociaciones mutuales quienes, al tener una disponibilidad reducida, respondieron ochenta y nueve durante el primer semestre del 2022. El cuestionario se envió por correo electrónico según la base de datos de la Superintendencia de Economía Social Solidaria de acceso abierto. El cuestionario constaba de quince preguntas de escogencia múltiple. Se tabularon los datos y se generaron las estadísticas descriptivas y los respectivos Figuras; el Alpha de Cronbach fue de 0,89. Las preguntas son:

1. ¿Han implementado tecnologías para mejorar procesos internos?
2. ¿Han implementado tecnologías en los últimos dos años para mejorar la experiencia de sus asociados?
3. Para el desarrollo de las actividades de la organización: ¿utiliza tecnologías de punta?
4. ¿Considera que los asociados de la organización tienen cultura digital (es decir hacen uso de herramientas digitales para transacciones)?
5. El uso de nuevas tecnologías: ¿han mejorado la prestación de los servicios?
6. ¿Se ha capacitado en avances tecnológicos?
7. ¿Ha presentado dificultades en la implementación de nuevas tecnologías? ¿Cuáles?

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para [24] *el aumento en la utilización de las nuevas tecnologías por parte de la sociedad actual contribuye a incrementar la eficacia de las organizaciones a la hora de permitir una comunicación bidireccional con los usuarios, potenciando una mejor relación entre organización y público objetivo* es por eso que, el 93% de las organizaciones de economía social en Colombia realiza implementaciones de tecnologías, que de una manera u otra han apuntado a dos focos importantes: mejorar los procesos internos (Figura 1) y mejorar la experiencia de sus asociados en los dos últimos años. El 93% considera que han implementado tecnología en los procesos internos; sin embargo, se detecta que la tecnología la asocian al funcionamiento cotidiano de la organización. Además, se configura que al ofrecer un nuevo servicio se considera que hay innovación ligada a los hechos tecnológicos.

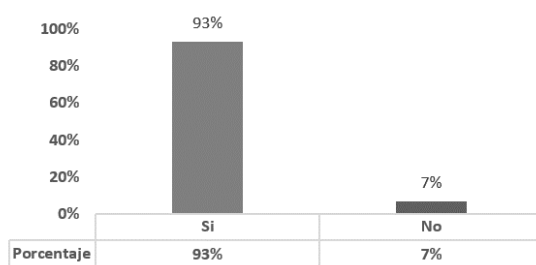


Figura 1. ¿Han implementado tecnologías para mejorar procesos internos?

En el Figura 2 se detecta que el 83% de los encuestados implementan tecnologías para mejorar la experiencia de los asociados; pero esta se liga en obtener datos de los clientes para alimentar la minería de datos de la organización; sin embargo, no utilizan los datos recolectados para mejorar la experiencia.

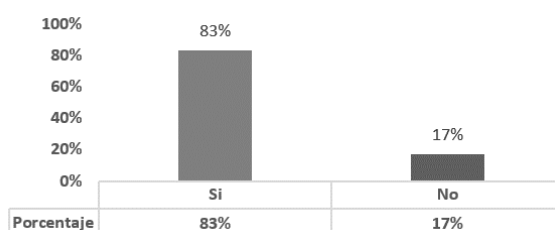


Figura 1. ¿Han implementado tecnologías en los últimos dos años para mejorar la experiencia de sus asociados?

Los datos recolectados son utilizados cuando el asociado se acerca a la entidad a solicitar una asesoría o un servicio específico, por ende, tiene la tecnología, pero no la utiliza al máximo. Hoy la sociedad es más consumista que años anteriores y está olvidando los principios y valores del cooperativismo, por ende, la tecnología es una herramienta para mejorar la divulgación de estos principios y retomar el bien social y ambiental.

Las organizaciones de economía social y solidaria desde el enfoque de las tecnologías, las más destacadas se encuentra la página web con un 75% (Figura 3). Es decir, [25] concluyeron que *la decisión de usar página web estaba ligada al tamaño empresarial de manera que eran las grandes compañías las que optaban en mayor medida por el uso de este nuevo canal de divulgación de información*. Se podría afirmarse que en la actualidad es mayor el uso de las páginas web por ser accesibles a cualquier tipo de organización independiente de su tamaño, éstas representan tranquilidad para los clientes y respaldo para las organizaciones. Seguido con un 25% (ver Figura 3) se encuentra el uso de CRM, es decir:

a través de CRM se gestiona el conocimiento sobre el cliente, se consigue una comunicación interactiva, personalizada y relevante con él, mediante la utilización de los canales tradicionales de comunicación y los canales electrónicos. EL CRM mezcla la tecnología y los recursos humanos para el logro de una comunicación eficaz con los clientes, es una herramienta a través de la cual se puede lograr la automatización del mercadeo, de la fuerza de ventas y del servicio al cliente [26].

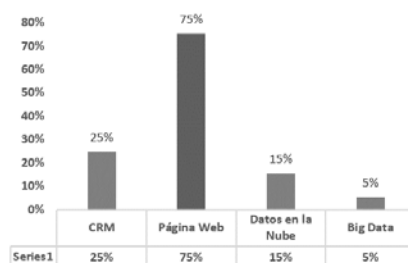


Figura 2. Medios tecnológicos invertidos en la organización

En otras palabras, el desarrollo e implementación de una estrategia de CRM, la empresa persigue incrementar la lealtad y fidelidad de los clientes; además, ofrece mejoras en el proceso de creación de valor, también mejora los resultados financieros y sociales. El CRM es considerado una nueva tecnología por las cooperativas, pero con un beneficio de estar en relación directamente con los asociados.

Las organizaciones de economía solidaria no utilizan Big Data como tecnología puesta piensan que todo el equipo de software y hardware es tecnología; es decir, desconociendo las nuevas tendencias en informática y en avances tecnológicos. En otras palabras, que permitan el mejoramiento comercial y de contacto mercantil.

Desde otro punto de vista, las cooperativas realizan el mercadeo con un mercado específicos y no de forma masiva. Por ende, la tecnología podría impulsar en el mercadeo a largo plazo y arriesgarse a invertir en tecnología; es decir, pensar en una nueva era de jóvenes con avances tecnológicos.

El 37% de las organizaciones de economía social y solidarias de Colombia (Figura 4) utilizan tecnología de punta y el 63% no utilizan tecnología de punta. Se aclara que las organizaciones consideran los recursos económicos y humanos esenciales para cumplir los objetivos de esta: 1) el aspecto económico se asocia al dinero y a la inversión para la adquisición de tecnologías; y 2) el talento humano se aplica a la capacitación para el desarrollo de innovación y la inserción de tecnología como una herramienta para facilitar su trabajo.

Es decir, la empresa tiene empleados motivados, capacitados, comprometidos, alineados con las políticas de innovación aportan a aceptar la tecnología como herramienta; pero se debe generar el cambio de aceptación total para que la organización tenga éxito [27].

La tecnología de punta en las organizaciones modernas juega un papel decisivo, pues, ella permite incrementar o mejorar los procesos en todos los ámbitos de las empresas [28]; dichas mejoras impactan al cliente final (los asociados), pues estos se adaptan a los cambios tecnológicos que la organización realice.

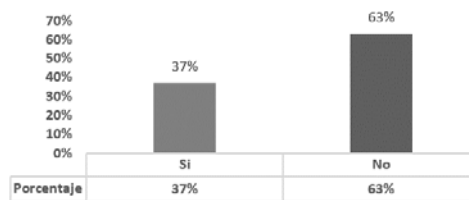


Figura 3. Para el desarrollo de las actividades de la organización: ¿utiliza tecnologías de punta?

Por otro lado, es importante analizar que el 10% de los clientes de las organizaciones de economía social y solidaria (Figura 5) no se han culturizado con las herramientas digitales; es decir, aún no se adaptan a estos cambios. Para dar solución a la problemática frente a la resistencia al cambio de los inmigrantes digitales, la desconfianza, la complejidad de procesos virtuales y la cultura digital es necesario investigar y proponer por parte de las organizaciones, estrategias que logren incrementar el porcentaje de adaptación de los clientes a las nuevas tecnologías [29].

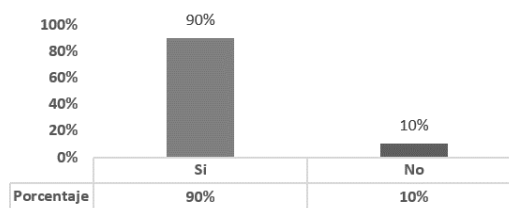


Figura 4. ¿Considera que los asociados de la organización tienen cultura digital (es decir hacen uso de herramientas digitales para transacciones)?

Es decir, la tecnología se aplica de forma favorable si antes de instalarla se realizan diversas investigaciones que expliquen las condiciones del sentido de la estrategia innovadora; además, analizar el aporte que sentirán los clientes al tener nuevas herramientas. Pero no todos los clientes aceptan los cambios de una relación humana hacia una relación con máquinas; por ende, se debe analizar la configuración de escuelas financieras.

El 90% de los encuestados considera que hay cultura digital a incorporar en la organización herramientas digitales para realizar las transacciones. Los gerentes consideran que cultura digital son costumbres y formas de interactuar con la sociedad desde el uso de recursos digitales como el internet. Esta tecnología aporta a configurar modelos, proceso y estructuras de sistemas que apalancan una visión empresarial de 360 grados y una mentalidad abierta al cambio.

El uso de las nuevas tecnologías mejoró la prestación de los servicios en el 93% de las organizaciones de economía social (Figura 6) y el 7% considera que no mejoró el servicio al incorporar tecnología. Se destacan que no hubo mejoría por el no incremento de clientes y asociados; fallas en la adaptabilidad del software, y la identificación del nicho de mercado al cual atiende; es decir, son personas mayores de 55 años que les dificultad utilizar los medios digitales o el mismo cajero electrónico y prefieren realizar la fila y conversar con un cajero humano. A su vez, se detectó que no aprovechan las inversiones en tecnología para la obtención de ventajas competitivas.

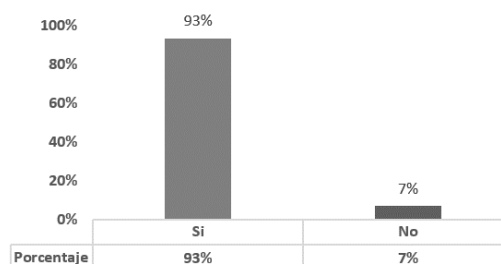


Figura 5. El uso de nuevas tecnologías ¿han mejorado la prestación de los servicios?

El 94% de las personas que laboran para organizaciones de economía social (Figura 7) se capacitan en avances tecnológicos. Es importante entender que las personas deben estar conscientes de la necesidad de

renovación del conocimiento que manejan para poder operar y sacar el mejor provecho de las inversiones que hacen las organizaciones en tecnología y también para darle a estas más posibilidades de adaptación [12]. En pocas palabras, se hace necesario cambiar y actualizar toda la información de conocimiento que se tienen sobre tecnología a medida que esta vaya evolucionando.

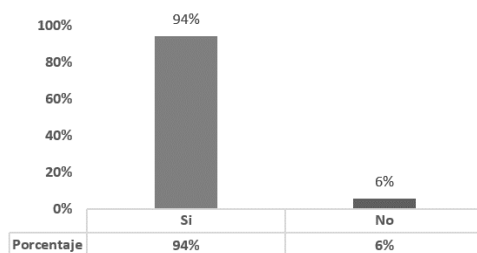


Figura 6. ¿Se ha capacitado en avances tecnológicos?

El 94% de los encuestados considera que hay avances en la capacitación en temas de tecnología. Los temas capacitados son: servicios al cliente, protocolos de seguridad, atención a los usuarios, manejo de nuevos sistemas de analíticas y minería de datos. Sin embargo, la capacitación en uso de tecnología afecta la salud como adicción, depresión, aislamiento social y enfermedades oculares y auditivas. En consecuencia, las capacitaciones se centran en el buen uso de la tecnología, pero no en el ser humano.

Las principales dificultades en la implementación de nuevas tecnologías en las organizaciones de economías social y solidaria en Colombia son: stress por cumplir las metas de servicios desde la misma tecnología, exigencias de dedicación para asimilar la nueva tecnología, altos costos en el mantenimiento de la tecnología y en la actualización de equipos; es decir, el 9% de los encuestados consideran que tienen dificultades en la implementación de nuevas tecnologías (Figura 8).

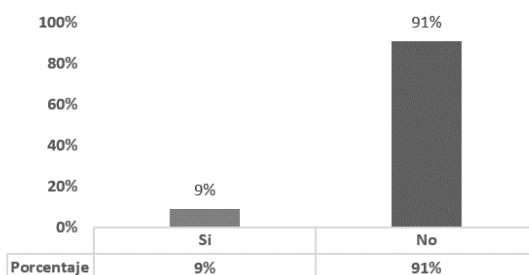


Figura 7. ¿Ha presentado dificultades en la implementación de nuevas tecnologías?

Sin embargo, las ventajas de implementar nuevas tecnologías, el 91% no han tenido dificultades; es decir, se capacita al personal antes de implementar, se ajusta la cultura organizacional, se dictan charlas de uso de tecnología y conversatorios que establecen que no habrá despido de personal al involucrar tecnología.

El 91% considera no tener dificultades en la implementación de nuevas tecnologías al aceptar los cambios y tener una mentalidad abierta. Además, se tiene una relación positiva en la asignación de tiempos para la selección de los datos que aporten a la toma de decisiones; a su vez, se capacita al personal en controlar la adicción a la interactividad, cursos de fraude en la consolidación de información; es decir, aprender a utilizar la tecnología en prevención de lavados de activos y suplantación de identidad. La economía social lograr tener una preferencia de cubrir la necesidad de los ciudadanos de una forma voluntaria. Es pensar en el otro como un sujeto que requiere de otro para vivir en armonía y no depender del dinero.

Las cooperativas de economía social y solidaria tienen la percepción o imaginario que desarrollan e implementan tecnología, pero estas confunden la realidad de qué es tecnología. Los gerentes intervienen el desarrollo de la cooperativa al indagar con los clientes lo que desean tener para la implementación de tecnología; es decir, hay una gestión interna de la organización, pero se debe analizar, además, los elementos externos. Es decir, configurar un híbrido de la realidad de las cooperativas para modificar la tecnología desde la aceptación de esta; además aceptar que tecnología no es solo la nube o la implementación de un sistema de información o minería de datos o un CRM.

Las clientes perciben la tecnología de las organizaciones de economía social y solidaria como un medio para facilitar las transacciones; es decir, agilizar los procesos por gestión del tiempo. Las organizaciones tienen la limitación del valor a invertir en tecnología y que otorgue valor presente positivo y tasa de retorno positiva. También, los gerentes deben convencer a los asociados del valor a invertir para mejorar la calidad y servicio. Sin embargo, la inversión es alta pero su tangibilidad no se asocia al beneficio que requiere el cliente; es decir, la tecnología como herramienta el cliente no la percibe como inversión sino como un gasto; a lo contrario de la gerencia de la organización.

Las organizaciones de economía social y solidaria no invierten la totalidad del proyecto, puesto lo establecen por etapas. En consecuencia, en ocasiones lo realizado en la primera etapa no conversa con la programación de sistemas de la segunda etapa por el cambio de proveedor; es decir hay un incremento en la inversión. A su vez, las organizaciones establecen que la tecnología es ajustar los procesos internos, la creación de sistemas de información y crear la nube para la gestión de estas. Sin embargo, no miden la capacidad de la nube con una mira a futuro, sino enfocada a corto plazo; por ende, creen que han invertido en tecnología de punta.

Desde otro lado, las organizaciones invierten en tecnología como la página web, pero no le enseñan al cliente a utilizarla. Además, no se acercan a los diferentes segmentos de los asociados para ofertar productos diferenciadores. Es decir, la gerencia adopta tecnología que cree que es de punta, cuando esta no supe las necesidades de los clientes. Al mismo tiempo, los asociados requieren atención personalizada para ciertos asuntos gerenciales, puesto una máquina no les entrega la información completa o con explicación complementaria de los requerimientos que ellos están solicitando.

Las páginas web son creadas por ingenieros de sistemas sin considerar las condiciones de los asociados. Por ejemplo: ciertas personas no identifican los colores o no tienen para el aumento de las letras o colores de esta, puesto se construyen desde la óptica del ingeniero y del apoyo del gerente de mercadeo y no de las necesidades de los usuarios. Además, las páginas web se crean y en ocasiones no le establecen herramientas de analíticas que ayudarían a tomar decisiones estratégicas. Además, realizan páginas web pesadas para los diferentes instrumentos tecnológicos de los clientes. También, se realizan las actividades del perfeccionamiento de la web, pero al tener el servidor y el dominio administrados por terceros, dificulta la solución de información hacia el cliente.

Los errores más comunes al implementar una página web en las organizaciones son: no haber colocado una bienvenida, deficiencia de la navegabilidad, no definir la propuesta de valor, no definir una lógica en la navegabilidad de la página, no colocar imágenes correctas y con los derechos de autor. Las organizaciones de economía social y solidaria consideran que al realizar una página web esta se debe enfocarse en un proveedor de igual condición; es decir, un proveedor con pensamiento social.

La configuración del CRM es solo un mecanismo de apertura de conocer ciertos detalles de los clientes, pero no es explotada en su máxima función estratégica. Es decir, se recolectan datos, pero no saben en realidad quien es el cliente y sus hábitos. Por ende, el sistema de información se convierte en un sistema de control de gestión interna y no de enfoque estratégico externo.

Ahora bien, el CRM móvil aporta en las organizaciones de economía social y solidaria tener información inmediata y valiosa y tener alertas sobre sus inversiones en las cooperativas. Al mismo tiempo permite una mayor fluidez de los temas de interés de la organización hacia el cliente. A su vez, posibilita la segmentación de los clientes con variables específicas para generar valor a la empresa y a sus grupos de interés.

Las dificultades al implementar un CRM o un sistema en la nube en las organizaciones de economía social y solidaria son: no haber realizado un análisis de la situación interna de la organización, no definir los empleados claves para el proceso, elegir un software con limitaciones de gestión de datos, la no compatibilidad con los otros sistemas que posee la organización y no tener claramente los objetivos y requerimiento del proyecto. Las organizaciones de economía social deben utilizar el CRM en redes para obtener nuevos asociados con la filosofía del cooperativismo.

Las capacitaciones se centran en el personal interno de las organizaciones, y en ocasiones se otorga capacitación a los usuarios externos de las nuevas tecnologías implementadas por la misma organización. Sin embargo, las cooperativas desarrollan tecnologías de comunicación para interactuar en tiempo real con los actores involucrados. Es decir, involucrar resultados a corto plazo, pero con la inclusión digital que aporte a comprender el uso y la importancia de la tecnología evolutiva. La comunicación es fundamental para las organizaciones al permitir el contacto en tiempo real con el asociado. Las cooperativas se centran en generar vínculos personales y tecnológicos en búsqueda de la productividad en la economía social y solidaria.

Los gerentes establecen políticas divergentes para entender el funcionamiento de la gestión de saberes al implementar la tecnología como elemento externo del ser humano. En consecuencia, las organizaciones promueven el desarrollo interno con el personal para identificar necesidades de tecnología. Sin embargo, los criterios son diversos al intentar incorporar el pensamiento del gerente, de los proveedores, empleados y asociados, puesto cada grupo tiene una mirada ajena sobre el uso de las tecnologías.

En otras palabras, las relaciones entre la comunicación interna y externa tienen elementos distorsionadores que desgastan la autogestión al pasar de un proceso simple a uno complejo por la implementación de las nuevas tecnologías. También, aportan a mejorar los sistemas de información desde la crítica emergente de la ciencia, la tecnología y usuarios. En consecuencia, se involucran los modelos de los sistemas para diseñar, producir y usar los bienes de la organización en pro del beneficio de la comunidad. Es decir, se enfrentan al dilema de inversión económica vs. Inversión social.

El estudio aporta que las organizaciones de economía social y solidaria de Colombia entraron a una era digital tardía, al pasar de una organización con características *homo economicus* a un ser un *homo social recíproco*. En otras palabras, el personal utiliza la tecnología para facilitar la interpretación de datos en información útil para la toma de decisiones; por lo tanto, las cooperativas se enfocan en el bienestar social, pero con un énfasis en lo económico.

Es decir, desde la gestión tecnológica se deben establecer datos de ingresos y egresos financieros, pero comprendiendo el hacer de las personas y su impacto en el ambiente natural. El *homo social recíproco* se estructura como un hombre que piensa en lo social y en la recuperación de la naturaleza, pero requiere de recursos económicos basados en datos acumulados y analizados por medio de la tecnología. Desde este mismo enfoque la tecnología aporta a la reducción de gastos como: energía, uso de papel, tintas no ecológicas, puertas de vidrio que ayudan al control de temperatura y reducción de consumo de luz. Por ende, la tecnología no es solo el uso de bases de datos en la nube y la creación de un sistema de CRM, sino lograr la gobernanza del triángulo de la sostenibilidad.

Los valores corporativos de las organizaciones de economía social y solidarias son el eje central de apoyar las actividades sociales, pero requieren de la tecnología para integrar esos valores a los asociados. Es decir, lograr el vínculo de los asociados con la organización al tener actualizados los datos de este en el sistema de información digital corporativa. También, aporta al incremento de la tecnología para aceptar los nuevos retos de estar en contacto con el cliente en tiempo real.

El 83% consideran la implementación de tecnologías, pero con una visión cortoplacista, por el simple hecho de entender al cliente desde la recolección de los datos personales; pero estos de deben cruzar entre variables para mejorar la segmentación y los servicios a ofertar. Es decir, la tecnología aporta al identificar las características de los asociados para ofrecer productos y servicios personalizados. Sin embargo, las cooperativas utilizan esta información como un medio masivo. Las organizaciones sociales dependen de abrir la mente y arriesgar a invertir en nuevas tecnologías para aumentar las redes en sistemas de información; es decir, repartir el costo entre cooperativas que ayuden a asimilar el mismo asociado en diferentes cooperativas.

En otras palabras, la economía social tiene el miedo de asociarse con otras organizaciones de economía social porque creen que les robarán los clientes; cuando lo que deben realizar son redes entre ellos.

Las redes en organizaciones de economía social apalancarían la asociatividad y podrían aportar nuevos desafíos en conjunto. Es decir, podrían utilizar la tecnología para ayudar a los asociados en un enfoque social y colaborativa. Las decisiones de los gerentes de las organizaciones sociales apalancarían la integración de un fenómeno mundial al pensar en las personas y no en lo económico; por ende, la tecnología sería una herramienta que ayudaría al mejorar el proceso de integración social.

5. CONCLUSIONES

Al analizar los datos del uso e implementación de nuevas tecnologías en organizaciones de economía social y solidaria en Colombia se detecta que los gerentes confunden los términos de innovación y tecnología. A su vez, consideran que la tecnología se centra en el uso de la nube, cajeros automáticos, sistemas de información, CRM, minería de datos y la creación de página web institucional. Sin embargo, se detectó que las condiciones de uso de nuevas tecnologías aportan a una noción de eficiencia y ahorro de tiempo en los procesos. Además, consideran aumentar la eficiencia del proceso al identificar indicadores de gestión desde el cliente interno hasta el externo.

Las organizaciones sociales están atrasadas en la implementación de tecnología, pero tienen el imaginario que están al día en ella al incluir sistemas de información de CRM; entendiendo que esta es una pequeña parte del macroproceso de la organización. Además, contribuir al aumento de la producción por empleado y a la racionalización en el uso de los recursos. También, hay elementos inconclusos de la computación en la nube por su baja capacidad. Así mismo, los sistemas de información requieren de buenos datos de entrada para generar salida de información para conservar el mercado.

Las organizaciones deben capacitar al personal para aceptar el cambio de la tecnología y considera al ser humano como parte de este proceso. A su vez, ajustar el clima organizacional para que los empleados aporten sus ideas de mejora continua en el proceso de implementar nuevas tecnologías. También, se debe estudiar las condiciones del entorno interno y externo para ajustar las necesidades de los clientes.

Los entes de economía social y solidaria están preocupados por implementar tecnología asociadas a la mejora de la interacción de la página web y de aprender a utilizar el CRM. Es decir, se debe tener suficientes datos para comprender el hacer del ser, pero al mismo tiempo involucrar los elementos ambientales y naturales con nueva tecnología que no la destruya.

Las organizaciones de economía social se enfrentan al dilema de impactar las actividades sociales con el apoyo de la sociedad para integrar lo humano con la tecnología para que amorage ese saber comunitario sin ánimo de lucro, pero con lucro social.

REFERENCIA

- [1] Prahalad C. y Hamel G. (2006) The core competence of the corporation. *Strategische unternehmungsplanung—strategische unternehmungsführung*. Springer.
- [2] González R. y Kindl S. (2012). Internationalization Process and Technological Capability. *Trajectory of Iguazu* (7)2, 117–130.
- [3] Saji B. y Ellingstad P. (2016). Social innovation model for business performance and innovation. *International Journal of Productivity and Performance Management* 65(2), 256-274.
- [4] Rincón C. y Garrigós J. (2017). Research and technology organizations' mobilizers of the regional environment: Competitive strategies. *European Journal of Management and Business Economics* 26(2), 180-198.
- [5] Squire K. (2017). Innovation in times of uncertainty. *On the Horizon*.
- [6] Pries J. y Baskerville R. (2017). The translation and adaptation of agile methods: a discourse of fragmentation and articulation. *Information Technology & People*.
- [7] Majumdar S. et al. (2015). *Technology and innovation for social change*. Springer.
- [8] Han T. et. al. (2022). Voluntary safety commitments provide an escape from over-regulation in AI development. *Technology in Society* 68, 101843.
- [9] Campos H. (2017). Impact of entrepreneurial passion on entrepreneurial orientation with the mediating role of entrepreneurial alertness for technology-based firms in Mexico. *Journal of small business and enterprise development*.

- [10] Souza de T. et al. (2018). The Technological Incubators of Solidarity Economy as a space for the development of technologies and social innovations. *Revista tecnología e sociedade* 14(32), 38-59.
- [11] Huang L. et al. (2021). Green technology collaboration network analysis of China's transportation sector: A patent-based analysis. *Scientific Programming*.
- [12] Mars M. (2014). Extending the legacy of the land grant institution as a social innovation: A new vision for university technology transfer and entrepreneurship. Emerald.
- [13] Bustelo P. y Aldasoro I. (2004). Estructura económica de Asia oriental. Ediciones AKAL.
- [14] Gargallo A. y Pérez J. (2017). El papel de las tecnologías de la información y la comunicación en las empresas de economía social. Press.
- [15] República de Colombia (2009). Ley 1341. Ministerio de la Tecnología, la Información y las Comunicaciones.
- [16] Agencia de Conectividad. (2007). Manual de comunicaciones. Ministerio de Comunicaciones.
- [17] Deux M. y Vannini P. (2016). Manual de Tecnologías abiertas para la gestión de las organizaciones de la Economía Social y Solidaria. Press.
- [18] Calandra P. y Araya M. (2009). Conociendo las TIC. Universidad de Chile.
- [19] Díaz W. (2013). Hacia una reflexión histórica de las TIC. *Hallazgos* 10(19), 213-233.
- [20] Grosso C. (2013). La economía social desde tres perspectivas: tercer sector, organizaciones no gubernamentales y entidades sin ánimo de lucro. *Tendencias y retos* 18(1), 143-158.
- [21] Charterina A. (2017). El principio de adhesión voluntaria y abierta desde una perspectiva histórica y doctrinal. *Boletín de la Asociación Internacional de Derecho Cooperativo*.
- [22] Charterina A. (2012). Sobre el principio de cooperación entre cooperativas en la actualidad. *Boletín de la Asociación Internacional de Derecho Cooperativo*.
- [23] Hogeland J. (2006). The economic culture of US agricultural cooperatives. *Culture & Agriculture* 28(2), 67-79.
- [24] Sánchez E. et al. (2008). Evaluación de la eficacia de las páginas web: Un análisis de contenido de las principales compañías aéreas. *Asociación Española de Dirección y Economía de la Empresa AEDEM*.
- [25] Larrán M. y Giner B. (2002). The use of the Internet for corporate reporting by Spanish companies. Press.
- [26] Tamayo L. (2020). Estrategia Customer Relationship Management en las PYMES. *Mega*.
- [27] Aguilera J. (2013). Memoria de Gestión 2010-2013. CONICYT.
- [28] Elorza M. et al. (2019). Estudio sobre la capacidad de acceso a los mercados internacionales de siete empresas del sector confecciones de la ciudad de Ibagué. *Omega*.
- [29] Gonzales A. (2017). El desarrollo de la banca electrónica y la aceptación de los clientes de Lima Metropolitana de los 4 principales Bancos del Perú. Press.

La gestión del riesgo integrada con la minería de procesos y la administración de procesos de negocios BPM: Una revisión de la literatura

Nathaly Consuelo Pérez Moreno¹
Elisa del Carmen Navarro Romero²
Universidad Santo Tomás
Colombia

Los entornos empresariales son cada vez más complejos y dinámicos, por lo que las organizaciones enfrentan diversos riesgos al ejecutar sus procesos. La finalidad de la gestión de riesgos es disminuir o neutralizar los riesgos potenciales. Tomando la perspectiva de riesgo, en la implementación del ciclo de vida propuesto por la gestión de los procesos de negocio empieza a cobrar importancia el poder detectar anticipadamente los riesgos que se derivan del modelado, implementación, ejecución, monitoreo y optimización de procesos. La gestión del riesgo se encuentra enmarcada por tres etapas principales de acción: identificación, análisis y control. Los riesgos son causados por incertidumbres, por lo que a menudo es difícil enmarcarlos de manera precisa, pero una forma de hacerlo es caracterizarlos. Al mapear los riesgos del ciclo de vida se ha demostrado que algunos son específicos de una fase del ciclo de vida, mientras que existen otros relacionados con el sistema y la estrategia en general, que afectan el ciclo de vida de los procesos en su totalidad. ¿Existen metodologías que involucren el análisis de riesgos en los procesos de negocio? ¿Cómo hacerlo a través de una minería de procesos? Para encontrar respuestas se evalúan técnicas y algoritmos de análisis de datos para observar y estratificar los riesgos en procesos de negocios para el sector productivo colombiano. Se identifica como solución al problema la implementación de Business Process Management BPM, ya que, por medio de métodos e instrumentos, les permite a las organizaciones aumentar el índice de innovación, mejorar la productividad y aumentar la sostenibilidad y competitividad en distintos escenarios, lo cual mejora los resultados de rendimiento basado en diseño, modelado, ejecución, automatización, medición, control y optimización de los procesos.

¹ Estudiante Ingeniería Industrial y Ambiental.

Contacto: nathalyperez@usantotomas.edu.co

² Magíster en Ingeniería Industrial.

Contacto: elisavarro@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 15 años la productividad en Colombia ha estado estancada y esto se evidencia con respecto a economías desarrolladas de otros países, generando un retraso en Colombia, afectando la situación económica de cada ciudadano, siendo más desfavorable en ciertas regiones donde se evidencia mayor pobreza. La materia prima continúa aumentando sus precios, y el crecimiento potencial de Colombia disminuyó en cerca de 1,5 puntos según el Banco de la República. Por tal motivo, el país debe innovar para generar mayores ingresos y así aumentar los niveles de confort para los colombianos [29].

El primer ítem donde se debe poner hincapié es el aumento de la productividad, sin embargo, vale la pena analizar que, si bien la productividad es un indicador de la mejora tecnológica, específicamente lo que mide es la eficiencia con la que utilizamos los factores de producción como es el capital y el trabajo. Tal eficiencia puede ser mejorada con avances tecnológicos, pero también puede ser el resultado de otra serie de elementos como las instituciones, la regulación o el desarrollo financiero que incluyen en la manera en que se asigna su capital.

El déficit de la productividad en las Pymes es la falta de tecnologías 4.0, por ejemplo, en la robótica solo se observan el 1%, en impresiones 3D el 2%. Dando como resultado que alcanzar los umbrales de conocimiento y para aumentar la productividad en las Pymes, se deben usar instrumentos de financiamiento para tener la adopción y aceleración de este tipo de tecnologías [35].

Según [30], para 2020 en Colombia había 5.740.953 Pymes, que representan el 90% del total de empresas, y más de la mitad no cuentan con apoyo financiero. Este perjuicio va afín con el impacto de la pandemia, ya que esto afectó a la Economía nacional y mundial ocasionando quiebres en las organizaciones. Colombia suele ser un país muy empresarial, pero es muy complejo mantener la organización o ser sostenibles, menos del 50% lo logran.

Un riesgo de negocio ayuda a tener un análisis del cumplimiento o no de los objetivos que quiere lograr la compañía, puede decirse, que es un estudio para que la compañía no se vea afectada más adelante [1]. Por su parte, los riesgos en los procesos de negocios que más se observan en las empresas se encuentran asociados a la competitividad, ya que las empresas deben rivalizar entre sí, ofreciendo más y mejores productos, a mejores precios, otro factor en los procesos de negocio, es la atención al cliente, ya que brinda un servicio de excelente calidad, pertinente, actualizado (tecnológicamente); todos estos factores contribuyen a que la empresa sea exitosa, así mismo genera una buena experiencia con el cliente [2].

La mayoría del sector productivo está en las Pymes con un 90% y por ello hay que examinar las operaciones deficientes que pueden provocar riesgos financieros, para así tener una mejora continua en cada actividad. Escasas alternativas de préstamo y altos costos transaccionales desincentivan el acceso a financiamiento de las empresas; el crecimiento económico del país está directamente relacionado con la capacidad de las entidades públicas al momento de reducir sus costos transaccionales de las empresas, pues ellos están conectando con su capacidad de sobrevivir a las guerras de mercados abiertos y globalizados [30].

El problema de la innovación es la falta de recursos y constancia, porque para la generación de una empresa primero se empieza con rentabilidades bajas para poco a poco tener una sostenibilidad, pero el ser humano está acostumbrado a aumentar el riesgo sin tener en cuenta que es más probable que el resultado final no sea el esperado. Un problema fundamental que se evidencia es que la mayoría de las pequeñas y medianas empresas son familiares, esto genera que los costos tanto de la organización como de la familia no sea organizado, ni se separe adecuadamente; generando la falta de crecimiento (plan de carrera) para los empleados. Por tal motivo, las organizaciones buscan ciertas disciplinas para mejorar los rendimientos, por ejemplo, Business Process Management, la cual se abordará más a fondo en esta investigación.

Independientemente de la complejidad de las empresas, es necesario analizar y rediseñar los procesos que afectan directamente sus rendimientos y desempeño, con el fin de agregar valor y posicionar la marca. La negligencia en el análisis de procesos significa que una empresa puede retrasarse en el cumplimiento de sus metas y objetivos estratégicos.

La falta de innovación o alineamiento de los procesos con los objetivos estratégicos conlleva la necesidad de una reingeniería de procesos, que aporte nuevas técnicas y herramientas para incrementar la productividad y mejorar la gestión empresarial. El adecuado análisis de la estructura y flujo de los procesos permite detectar a priori posibles anomalías que, en función de su gravedad y nivel de gestión, afecten a la marcha de la empresa, incluida su posible liquidación.

Ante este escenario, diversas organizaciones han propuesto marcos regulatorios para orientar a las empresas en la gestión de sus procesos, tal es el caso de normas y estándares como la ISO 27001, Committee of Sponsoring Organisations of the Tradeway Commission COSO y Control Objectives for Information and related Technology COBIT.

2. MÉTODO

Por medio de una revisión de la literatura, tomada del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación CRAI-USTA, se abordó el tema de Business Process Management desde las bases de datos Scopus y Web of Scienc, se utilizó una metodología PRISMA [1], con las cuales se tuvieron en cuenta los siguientes criterios, para depurar la información como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Revisión de la literatura

Método	Lista de verificación															
Criterios de elegibilidad	Criterios de inclusión: artículos científicos publicados, tanto en inglés como en español, de los últimos 5 años (2017- 2021) incluyendo los artículos publicados en lo corrido del 2022. Criterios de exclusión: artículos incompletos, que no sean de acceso libre.															
Fuentes de información	Se revisaron las bases de datos SCOPUS Y WOS (Web of Science), ya que fueron las que presentaron mayor número de artículos que cumplieran con los criterios de búsqueda.															
	Ecuación Primera búsqueda															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Scopus</th> <th>Wos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND RISK)</td> <td>10425</td> <td>5004</td> </tr> <tr> <td>"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND "RISK MANAGEMENT")</td> <td>3290</td> <td>1579</td> </tr> <tr> <td>"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND "RISK MANAGEMENT" AND "PROCESS MINING"</td> <td>154</td> <td>198</td> </tr> <tr> <td>"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND "RISK MANAGEMENT" AND "INTEGRATION")</td> <td>251</td> <td>119</td> </tr> </tbody> </table>		Scopus	Wos	"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND RISK)	10425	5004	"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND "RISK MANAGEMENT")	3290	1579	"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND "RISK MANAGEMENT" AND "PROCESS MINING"	154	198	"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND "RISK MANAGEMENT" AND "INTEGRATION")	251	119
	Scopus	Wos														
"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND RISK)	10425	5004														
"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND "RISK MANAGEMENT")	3290	1579														
"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND "RISK MANAGEMENT" AND "PROCESS MINING"	154	198														
"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND "RISK MANAGEMENT" AND "INTEGRATION")	251	119														
Estrategia de búsqueda	Ecuación segunda búsqueda															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Scopus</th> <th>Wos [EDCNR1]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND RISK MANAGEMEN" T AND "STADISTIC"</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>RISK AND PROCESS AND MODEL</td> <td>17</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>"KEY SUCCESS FACTORS" AND "RISK MANAGEMENT" AND "PROCESS")</td> <td>5</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND RISK MANAGEMEN" T AND "STADISTIC"</td> <td>4</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>		Scopus	Wos [EDCNR1]	"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND RISK MANAGEMEN" T AND "STADISTIC"	4	5	RISK AND PROCESS AND MODEL	17	22	"KEY SUCCESS FACTORS" AND "RISK MANAGEMENT" AND "PROCESS")	5	3	"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND RISK MANAGEMEN" T AND "STADISTIC"	4	2
	Scopus	Wos [EDCNR1]														
"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND RISK MANAGEMEN" T AND "STADISTIC"	4	5														
RISK AND PROCESS AND MODEL	17	22														
"KEY SUCCESS FACTORS" AND "RISK MANAGEMENT" AND "PROCESS")	5	3														
"BUSINESS PROCESS MANAGEMENT" AND RISK MANAGEMEN" T AND "STADISTIC"	4	2														
Proceso de selección de los estudios	En una revisión por parte de los dos autores, se revisaron aspectos como (autores, año, Fuente, citas, DOI, palabras claves, objetivo, aporte, sector Económico (aplicado), método de evaluación, algoritmo, limitaciones, investigaciones futuras, temáticas abarcadas (BPM, PM, RM).															
Proceso de extracción de los datos	Para extraer los datos de los informes, por parte de los investigadores de manera independiente y a través de una plantilla de Excel, se revisó que no existiera duplicidad en los artículos.															

Con base la revisión de la bibliografía realizada, se compilaron los aportes más significativos para los artículos que se cumplieran con la totalidad de los criterios y en los cuales mencionan los aportes de una visión multipropósito entre el BPM, la gestión de los riesgos y la minería de procesos.

En las siguientes Figuras se puede observar que son pocos los artículos que involucran las tres temáticas y en su mayoría están asociados a las ciencias computacionales, las matemáticas y la ingeniería. La Figura 1 muestra el volumen de publicaciones realizadas, desde 2017 hasta julio de 2022.

En la Figura 2 se puede detallar que la mayoría de las publicaciones en un 50% están relacionadas con el campo de las ciencias computacionales, seguido de Ingeniería en un 17,6%, lo cual era de esperarse debido al uso de la inteligencia artificial en estas disciplinas.

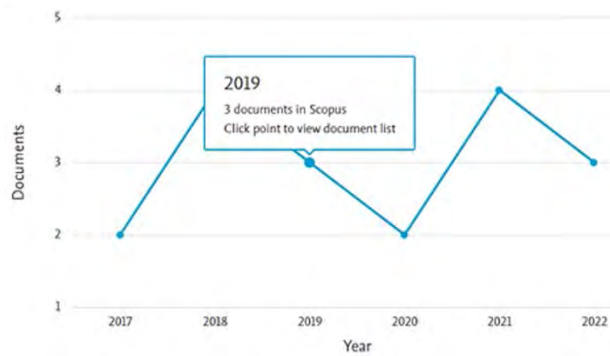


Figura 1. Artículos asociados a BPM, gestión de riesgos y minería de procesos por año

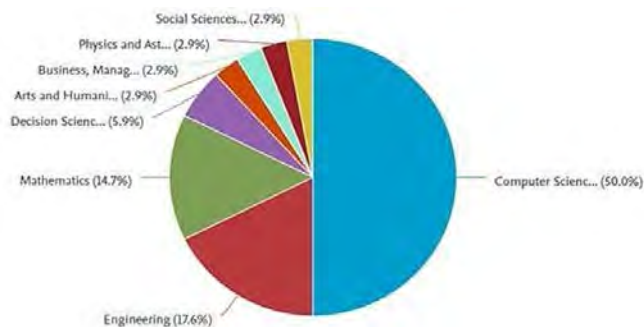


Figura 2. Artículos asociados a BPM, gestión de riesgos y minería de procesos por área

Para realizar el tamizaje de la información, se trabajó con la declaración Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses PRISMA [11], la cual aporta un diagrama de flujo en el que se puede visualizar el desarrollo de la investigación, como se puede observar en la Figura 3.

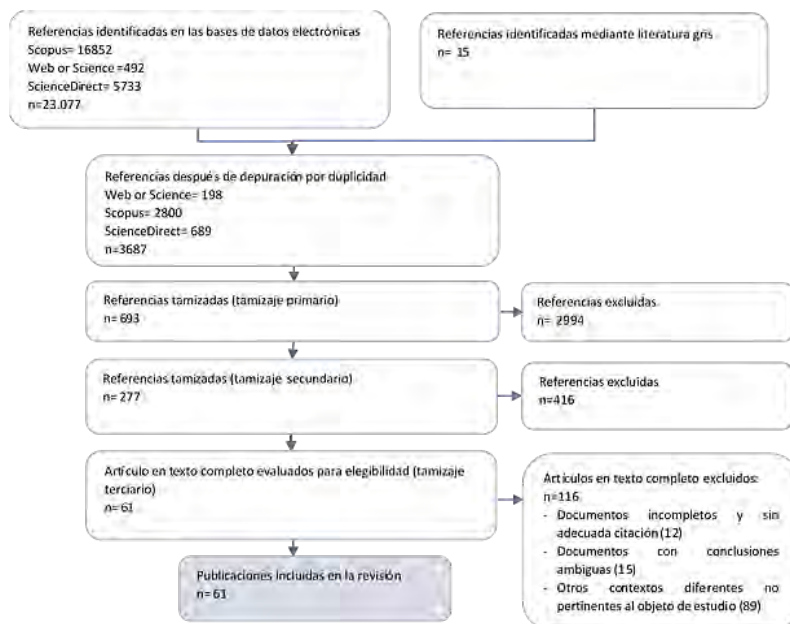


Figura 3. Adaptación del enfoque PRISMA para revisiones sistemáticas

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Tecnología de procesos de gestión de riesgos

Cada organización utiliza un ciclo de vida para los procesos de negocio, objetivos y una naturaleza particular que hace que su organización y modelo de negocio varía en función del sector económico en el que ellos operan; por ello, la gestión y control que se realiza en las empresas no es estándar y por lo tanto, un factor importante como lo es la identificación, análisis y la gestión de riesgos cambia según las características del negocio. De la mano con la tecnología, este proceso se hace más llevadero debido a un mayor control y

predicción del posible desempeño de la empresa, ya que facilita la toma de decisiones financieras en entornos de completa incertidumbre [53].

En cuanto a las herramientas informáticas, software como Odoo, Oracle E-Business Suite, Microsoft Dynamics y SAP, que son relevantes en términos de sistemas Enterprise Resource Planning Systems ERP, que cuenta con módulos encargados de realizar una gestión general de riesgos organizacionales y software a la medida, enfocado a sectores económicos. como la tecnología de la información, las finanzas sector y otros [52].

En cuanto al sector TI, es posible encontrar desarrollo web cuyo fin sea la generación de planes de riesgos de software [63], para el uso de entidades emergentes clasificadas como micro y pequeñas empresas, con el fin de mejorar los productos de software mediante gestionar los riesgos presentes. Las tecnologías emergentes no se quedan fuera de estos procesos de tipo empresarial, herramientas basadas en tecnologías 4.0 como Machine Learning, Blockchain, Big Data y Cloud computing, han sido involucrados en un proceso de análisis para verificar su impacto en la madurez de lo digital transformación, la presión del mercado y el beneficio obtenido por las empresas [46].

En países como China, blockchain ha comenzado a usarse para resolver múltiples riesgos comerciales a través de la trazabilidad, la autenticidad compartida y el control de procesos divisibles [63]. Filtrando la información y con la ayuda del software VosViewer se obtiene la red bibliométrica de la Figura 4.

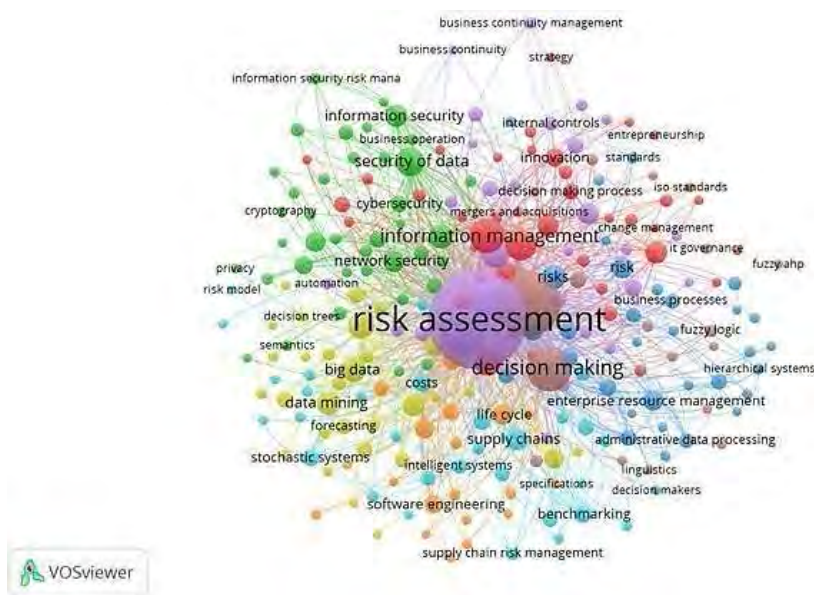


Figura 4. Red bibliométrica, ecuación de búsqueda (riesgo Y evaluación Y negocio Y procesos)

3.2 Inteligencia artificial en la gestión del riesgo empresarial

Tecnologías como Machine Learning y Deep Learning han facilitado diferentes procesos de negocio, debido al gran complemento que significan para la toma de decisiones a través del análisis de datos y estadísticas. Existen varios estudios en los que se comparan ambas metodologías teniendo en cuenta la monitorización de procesos de negocio [45] en los que entra en juego la homogeneidad de las instancias y la ganancia de información que existe durante la ejecución de las técnicas.

Específicamente entrando en el tema relacionado con la gestión de riesgos, existe literatura relacionada tanto con Machine Learning como con Deep Learning, teniendo en cuenta la existencia de una importante variedad de material enfocado a riesgos en la industria financiera y bancaria. En cuanto al aprendizaje automático, [49] proponen la integración del Aprendizaje Automático con el análisis envolvente de datos DEA mediante el uso de una red neuronal artificial, dando como resultado una mayor efectividad en la aplicación del análisis Failure Modal Effects Analysis FMEA utilizando herramientas relacionadas con el aprendizaje automático [62].

En cuanto al Deep Learning, se utilizan técnicas como las redes bayesianas impulsadas por lógica difusa. El objetivo de la investigación es digitalizar completamente la expresión de riesgo, mediante la formación de un índice basado en lógica difusa que evite la ambigüedad en el proceso de traspaso de una variable lingüística a una digital, esto se suma como índice del tamaño de nodo en una red bayesiana, con el fin de mejorar la visualización del riesgo, su adecuada gestión y comunicación para toma de decisiones [48, 55].

Thabet R. et al. *AdoBPRIM: Towards a new healthcare risk-aware business process management tool*, identificaron y analizaron riesgos de errores de medicación relacionados con el complejo proceso de uso de medicamentos. El método sugiere un enfoque integrador con tres componentes con respecto al BPRIM: Una unificación conceptual de riesgo y proceso de negocio, Un lenguaje de modelado BPRIM compuesto por sintaxis abstracta y concreta y Un ciclo de vida BPRIM basado en el acoplamiento de la gestión de procesos de negocio y los ciclos de vida de la gestión de riesgos. La principal contribución de este documento es la implementación de un enfoque eficaz para gestionar los errores en los medicamentos relacionados con el Proceso de Uso de Medicamentos basado en el concepto de gestión de riesgo.

El objetivo de Panjehfouladgaran H. et al. *Reverse logistics risk management: Identification, clustering and risk mitigation strategies* es entender el crecimiento de la población, los cambios tecnológicos radicales y la diversificación de productos y servicios han llevado a una enorme extracción de materias primas, un consumo excesivo y una generación masiva de residuos. Analizar los beneficios económicos, como la reducción de costes y la consecución de los objetivos de responsabilidad social corporativa. Este estudio ha identificado una lista completa de factores de riesgo de LR. cuando de cerca examinados, se pueden clasificar ampliamente en: grupos estratégicos, tácticos y operativos. El factor de riesgo LR gana mucha atención en las últimas décadas debido a su relevancia para la protección del medio ambiente, la reducción del consumo de energía, la utilización eficiente de los recursos y la reducción de costos. Sin embargo, la gestión de las operaciones de RL parece arriesgada para la mayoría de las empresas, ayuda a identificar, evaluar y controlar los riesgos negativos y positivos. La investigación futura puede validar los factores administrando encuestas a una población de muestra más grande y empleando una técnica estadística más parsimoniosa para investigar las relaciones causales subyacentes con un cierto rendimiento dependiente de interés.

Prollochs N. y Feuerriegel S. *Business analytics for strategic management: Identifying and assessing corporate challenges via topic modeling*, diseñan herramientas y conceptos de gestión para medir el desempeño de empresas, se basa en análisis avanzados, se beneficia de la automatización. Por medio de herramientas de gestión como informes de la industria de agencias especializadas, análisis FODA específicos de la empresa o matrices de crecimiento-fuerza. Una posible informatización se refleja en el enfoque, que aprovecha las innovaciones recientes en análisis avanzado y, especialmente, en minería de texto. Más específicamente, infiere problemas en emprendimientos empresariales a partir de materiales narrativos y asigna diferentes puntajes de resistencia al riesgo a estos materiales en función del estilo lingüístico. Por un lado, esto permite realizar un seguimiento del desempeño interno en áreas centrales y también funciona como un mecanismo de alerta temprana para desarrollos críticos.

Li L. et al. en *Efficiency analysis of machine learning intelligent investment based on K-Means algorithm* tienen la idea de construir un modelo de inversión práctico a través de una variedad de algoritmos más maduros. En la actualidad, la mayoría de los productos de inversión inteligente en el mercado son *inversión semi-inteligente*, basados principalmente en servicios manuales y complementados con servicios de máquinas. La inversión inteligente ideal debería cubrir todos los aspectos del análisis de clientes, la asignación de activos, la selección de carteras, la ejecución de transacciones, la gestión posterior a la inversión, etc., y la mano de obra solo requiere un grado limitado de participación. Se usa un método de agrupamiento tipo caja consiste en cargar datos en diferentes cuadros de datos de acuerdo con una determinada regla algoritmo, y luego suavizar los datos en el cuadro para lograr el propósito de reducir la influencia de los datos de ruido. La inversión inteligente como tendencia importante en el desarrollo de la industria está destinada a promover un nuevo patrón en el campo de la ciencia y la tecnología.

En *A business process analysis methodology based on process mining for complaint handling service processes*, Wu Q. et al. muestran que el análisis del proceso empresarial de gestión de reclamaciones,

basado en la minería de procesos puede ayudar a la empresa a gestionar los en el ámbito empresarial. Dado que los detalles del proceso de gestión de reclamaciones se han registrado en varios sistemas de información de las empresas, la explotación de los datos registrados con técnicas orientadas al proceso puede ayudar a comprender mejor los procesos de gestión de reclamaciones. Además, los resultados del análisis de los datos del proceso pueden proporcionar una guía valiosa para mejorar la calidad del servicio de manejo de quejas CHS. La metodología de este estudio puede integrar los resultados del diagnóstico de procesos desde diferentes perspectivas de Process mining PM y analizar el proceso desde diferentes niveles del sistema.

Por su parte, Thabet R. et al. *Risk-aware business process management using multi-view modeling: method and tool*, presentan la conceptualización, la implementación y la evaluación empírica de e-BPRIM, una extensión de modelado multivista del Método Integrado de Gestión de Riesgos de Procesos Empresariales BPRIM. Busca razonar sobre la probabilidad y los impactos de la ocurrencia de varios tipos de riesgos, uno de los cuales es el riesgo de que los procesos de negocio violen algunas normas legislativas. Los mecanismos y algoritmos de soporte de vista múltiple implementados funcionan correctamente.

Engelberg G. en *Process-aware attack-graphs for risk quantification and mitigation in industrial infrastructures* cuantifica el riesgo de ciberseguridad sobre los diferentes activos dentro de la industria infraestructura, mapear este riesgo al nivel abstracto del negocio y cómo propagarlo y recomendar y priorizar qué problemas deben abordarse para mitigar el riesgo sobre los diferentes elementos del proceso. Hace un desarrollo de un marco consciente de procesos para la cuantificación y mitigación de riesgos de ciberseguridad en infraestructuras industriales. Pero se observa que surge la necesidad de una gestión de riesgos de seguridad cibernética centrada en el negocio, la literatura existente carece de un enfoque holístico consciente de los procesos.

Kamala B. y Latha B. *Process Mining and Deep Neural Network approach for the Prediction of Business Process Outcome*, hacen un proceso de descubrimiento, proceso de conformidad y proceso mejora; donde usan los algoritmos Deep learning DL, se utilizan para encontrar una serie de tareas para mejorar la eficiencia del proceso, ya que se pueden fusionar la inteligencia artificial y técnicas de minería de procesos para automatizar la implementación de nuevos modelos de procesos sin causar mucha modificación en las operaciones. Estos se utilizan para averiguar cuántos recursos se requieren para completar una tarea específica. Dado que la minería de procesos utiliza registros de eventos para extraer conocimiento sobre los procesos, hace que sea posible obtener conocimientos basados en hechos y no en suposiciones. Las técnicas Deep Learning y la minería de procesos tienen una fuerte relación con la inteligencia artificial y el aprendizaje automático que proporcionan un enfoque de inteligencia de negocios.

Y Zerbino P. et al. *Process-mining-enabled audit of information systems: Methodology and an application*, muestran un descubrimiento de procesos, cuyo propósito es producir el modelo real de un proceso sin la necesidad de depender de información a priori, conformidad del proceso, que verifica si la información en el registro se ajusta a un modelo de proceso, requisitos comerciales o políticas a cumplir, mejora de procesos, que tiene como objetivo mejorar o ampliar un modelo de proceso existente. Pero existen amenazas relevantes desde una perspectiva administrativa, operativa y legal.

Teniendo en cuenta otros artículos se observa que la minería de procesos va de la mano con la gestión de procesos comerciales y el enfoque de inteligencia comercial, debido que, supervisa y mejora el proceso real, haciendo un barrido de información confiable para que esta pueda ser tomada en cuenta y así optimizar procesos industriales junto a la mejora continua. Se tienen en cuenta tres pasos para la minería de datos:

1. *Proceso de descubrimiento*, en el cual se busca información básica donde no se conoce ningún valor o resultado para así generar un modelo, almacenando la información para procesarla.
2. *Proceso de conformidad*, donde luego de buscar la información se crea el modelo a partir del evento generado.
3. *Mejora del proceso*, donde analizado el modelo se busca la mejor solución y si los resultados son viables se usa para perfeccionar la sucesión.

Esto es muy útil porque se generan resultados en base de registros reales, los cuales son base de un conocimiento previo y por ello no es un supuesto. Para darle un plus a los modelos, la mayoría de las empresas suelen fusionar la inteligencia artificial y el proceso de minería, para que sea aún más competente, otro factor clave en esta fusión es la tecnología de aprendizaje que automatiza la implementación de nuevos modelos de procesos sin generar modificaciones en los cálculos. Estos se utilizan para averiguar cuántos recursos se requieren para completar una tarea específica.

El mundo avanza aceleradamente y, por consiguiente, hoy en día por los adelantos tecnológicos hay más vulnerabilidad a ataques cibernéticos. La cuantificación y mitigación de riesgos de seguridad cibernética es un área bien investigada, generalmente basada en una representación del comportamiento potencial del adversario dentro de un sistema. Los avances normativos y la tendencia de digitalización han requerido más transparencia, enfoques mejorados de gestión de riesgos y sistemas de auditoría más avanzados.

Con respecto a los artículos se puede evidenciar que es importante la minería de datos para la gestión del riesgo, ya que por medio de esta se adquiere la información mercantil deseada de manera innovadora. Esta base para tomar decisiones organizacionales. Cumple la función de tomar información estratégicamente tanto de los consumidores como de la parte interna de la organización, siendo consistente y clara. Las tres metodologías dominantes para el proceso de la minería de datos son KDD, CRISP-DM y SEMMA.

3.4 BPM y minería de datos

3.4.1 Knowledge Discovery in Databases KDD

Es una metodología que propone cinco fases: selección, pre procesamiento, transformación, minería de datos, evaluación e implantación mediante un proceso iterativo e interactivo [11]. En la Figura 4 se presentan los pasos para llevar a cabo la metodología KDD.

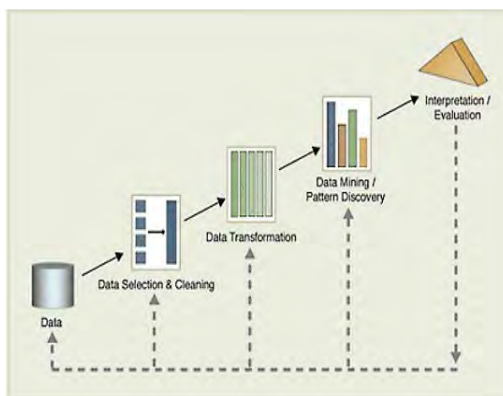


Figura 5. Pasos de la metodología KDD [12]

Para las organizaciones los datos recolectados son materia prima que permiten reconocer patrones de fenómenos o sucesos, estos pueden ser las preferencias de los usuarios o el análisis productos de acuerdo con la temporada, necesitando de la minería para interpretar grandes bases de datos. Esta establece una base de datos con respecto a un tema en específico, donde se generan subconjuntos para llegar a un resultado final. Posteriormente, depura la información, para así eliminar los datos que no aportan al proceso, dándole una significancia a la información, para cumplir con el objetivo.

Luego de tener los datos acertados, se elige el algoritmo de minería de datos, así buscar patrones de interés y así conocer los gustos y preferencias de los usuarios. Se debe visibilizar los patrones y modelos, en este paso se pueden tomar decisiones por medio de los conocimientos obtenidos, adoptando nuevas medidas que beneficien a la organización.

3.4.2 Sample, Explore, Modify, Model, Assess SEMMA

Que lo constituyen las siguientes fases y actividades [13]:

- **SAMPLE:** Es el punto de partida para realizar el método SEMMA, donde se extrae una parte del conjunto de datos que se busca estudiar. La muestra seleccionada debe tener tres características, debe ser significativa, representativa y manipulable.
- **EXPLORE:** Es la fase descriptiva donde se realiza un análisis exploratorio de los datos, a partir de una exploración visual y numérica de los datos que tiene como finalidad realizar un resumen que permita reconocer inicialmente patrones
- **MODIFY:** Para que los datos puedan ser procesados mediante técnicas estadísticas deben ser organizados, en esta fase se busca depurar la información buscando eficiencia en el modelo, de manera que se deben seleccionar variables que se consideren importantes y si resulta necesario crear nuevas, además de transformar algunas y finalmente analizar los valores atípicos. El objetivo de esta fase es la de reducir las dimensiones de la base de datos de forma que las variables significativas sean las que más información puedan aportar al estudio que se realiza.
- **MODEL:** Para el modelamiento se requiere la aplicación de técnicas de minería de datos, que en la mayoría de estudios no se limitan a utilizar una sola, sino más bien se pueden aplicar varias de ellas simultáneamente. Ya sean los árboles de decisión, análisis de conglomerados, modelos logísticos, análisis de series temporales, entre otras.
- **ASSESS:** Para finalizar se realiza una verificación de la utilidad de la información descubierta y confiabilidad del modelo que se realiza a partir de la aplicación del método. Con el objetivo de estimar qué tan bien funciona el modelo, el usuario debe probar distintos conjuntos de datos con los que comparar los resultados conociendo el desempeño del modelo.

3.4.3 Cross-industry standard process for data mining CRISPDm

Iniciativa financiada por la Comunidad Europea para desarrollar una plataforma para Minería de Datos. Se trata de un modelo estándar abierto del proceso que describe los enfoques comunes que utilizan los especialistas en minería de datos, es el modelo analítico más usado [15]. En la Figura 6, se muestra el ciclo de vida propuesta por IBM.

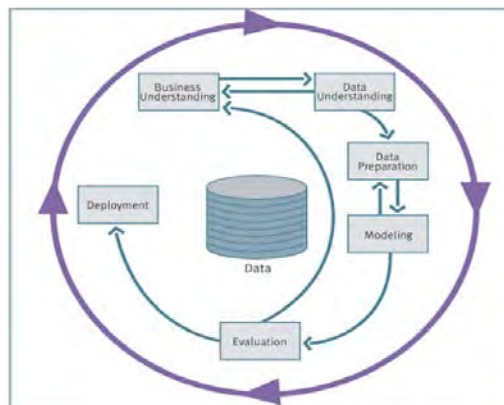


Figura 6. Ciclo de vida de minería de datos CRISP-DM [16]

1. **Comprensión del negocio:** La metodología parte del conocimiento de los objetivos de la organización que se quiere intervenir, por esta razón es necesaria una evaluación de la situación actual de la compañía dirigida a la problemática que se quiere trabajar. Posteriormente se establecen los objetivos de la implementación de la metodología en la que se deben incluir intereses y necesidades, además de la razón por la que se realiza el estudio. Finalmente se crea el plan del proyecto donde se recopila toda esta información y se agregan los responsables del proyecto, propósitos y el presupuesto asignado.
2. **Comprensión de los datos:** Esta fase inicia con el análisis exploratorio de los datos que pertenecen a las bases de datos de la organización, se realiza este análisis con el fin de verificar la calidad de los datos que pueden presentar anomalías o errores.
3. **Preparación de Datos:** En esta fase se realiza la depuración de los datos, se seleccionan y revisan con el fin de tener una materia prima organizada y lista para realizar la minería de datos. Durante esta etapa

se verifica la importancia de cada variable, teniendo en cuenta que podemos construir nuevas variables, integrar datos de otras bases de datos, transformarlos y si se requiere realizar una normalización de los datos.

4. *Modelamiento*: Utilizando las técnicas de minería de datos podemos reconocer patrones, confirmar o desechar hipótesis y crear modelos. Dependiendo del propósito del modelo que puede ser una estimación, clasificación o agrupamiento debemos escoger el tipo de técnica que más se ajuste a nuestro objetivo.
5. *Evaluación*: Para este método la fase de evaluación no solo verifica la validez y utilidad del modelo, busca identificar otras necesidades que puedan surgir del proceso. Una correcta interpretación de los resultados obtenidos permite una toma de decisiones efectivas que impacten la problemática que inicialmente se planteó.
6. *Despliegue*: Finalmente y como fase adicional de esta metodología se busca que el conocimiento adquirido sea implementado en la organización, utilizando los modelos y evaluando su impacto. Este proceso requiere de un monitoreo que permita conocer si el modelo pierde utilidad con el tiempo, si debe ser actualizado o si el proceso debe iniciar de nuevo diseñando un nuevo modelo que se enfrente a una problemática nueva.

Al comparar las tres metodologías se encuentra que KDD fue el primer modelo diseñado para la minería de datos siendo un método mediante el cual se realiza un análisis de los datos en busca de patrones, fue aceptado por la comunidad científica que buscaba el manejo de datos utilizando la identificación de patrones que fueran novedosos y útiles para comprender sucesos o acontecimientos relacionados con las decisiones de los usuarios que finalmente alimentan las bases de datos, de esta forma a partir de la implementación de métodos estadísticos y machine learning se establecen las etapas principales necesarias para realizar un proyecto de explotación de información.

La metodología SEMMA se encuentra enfocada especialmente en aspectos técnicos, diseñada para facilitar la aplicación de técnicas estadísticas enfocadas a una mejor visualización de los datos estudiados que además permite revisar la precisión de los modelos, pero que excluye actividades de análisis y comprensión del problema que se busca mitigar con el método. Por último, la metodología CRISP-DM que establece un conjunto de tareas y actividades para cada fase del proyecto, pero no especifica cómo llevarlas a cabo, aunque es muy utilizada ya que se enfoca los resultados en el entorno del negocio y tiene cierta independencia con respecto a las herramientas para la minería de datos implementadas. En la Tabla 2 se presenta una comparación de las metodologías.

Tabla 2. Cuadro comparativo entre KDD, SEMMA y CRISP-DM. Fuente: Propia. **Fuente:** Autores

KDD	SEMMA	CRISP-DM
Pre KDD	N/A	Conocimiento del negocio
Selección	Muestra	
Preprocesamiento	Exploración	
Transformación	Modificación	Conocimiento de los datos
Minería de datos	Modelo	
Interpretación / Evaluación	Evaluación	
Post KDD	N/A	

4. CONCLUSIONES

Business Process Management BPM es una metodología de trabajo utilizada tanto por grandes empresas como por Pymes. Es el sistema de gestión de procesos se encarga de controlar el modelado, visibilidad y gestión de los procesos productivos de la empresa, ayuda a minimizar los riesgos por medio de un análisis de la relación de los procesos con los elementos importantes de la organización (como la estrategia, los sistemas de información, los datos y la infraestructura, e identificar los riesgos asociados al proceso o a las actividades del proceso). En otras palabras, es una metodología que se enfoca en el manejo de los procesos que debe ir direccionado a cumplir con los objetivos de la organización ya sea buscando la reducción en costos de los procesos, el incremento de la calidad, procesos más efectivos y eficientes que se pueden traducir en menos reclamos de los clientes y mayor exactitud en los pronósticos.

La metodología se basa en un ciclo que inicia con el diseño del proceso, luego se encuentra la configuración de sistemas que permite seguir con la implementación del proceso y finaliza con un diagnóstico que nos permita conocer si se cumplen con las expectativas del proceso, por medio de esta disciplina es más factible solucionar los inconvenientes analizados, ya que, BPM tiene un enfoque más amplio, teniendo en cuenta los recursos, permitiendo de esa manera encontrar soluciones a las problemáticas empresariales. Muestra efectos palpables desde el principio de los procesos, permite generar estadísticas apoyado en la tecnología usada en BPMN, al monitorear y documentar los procesos relevantes [44].

Conocer cómo los procesos y actividades en la organización interactúan, facilita que la atención al cliente (interno o externo) mejore significativamente, al tener en cuenta sus necesidades y al contar con un soporte tecnológico que automatice la tarea y evite materialización de fallas o riesgos en los procesos permitiendo así garantizar la calidad del trabajo. La gestión del riesgo dentro de la empresa implica conocer éstos en profundidad para poder darles un tratamiento adecuado. Cuando las empresas logran identificar, cuantificar, responder y vigilar las consecuencias de eventos potenciales, pueden prever todos los posibles casos que se puedan dar y establecer el camino a seguir para darles solución a las diferentes situaciones organizacionales.

Por medio de un modelado de procesos de negocios, las organizaciones en general han logrado optimizar sus procesos, a través de un diseño de procesos robusto y estandarizado. De igual forma, a través de la gestión de riesgos las empresas buscan garantizar que se identifique, analice y responda adecuadamente a los riesgos que pueden afectar negativamente la realización de los objetivos estratégicos de las organizaciones. Sobre la base de la evaluación de riesgos, una organización deberá elegir si acepta, mitiga o transfiere el riesgo a otro proceso o al mismo.

Cuando se realiza de manera efectiva, la gestión de los riesgos en los procesos de negocio se asegura que se prioricen los recursos limitados de la organización para abordar de la manera más eficiente los problemas que más les afectarán, y se logre de esa manera su continuidad y sostenibilidad. A pesar de los beneficios que traen los BPM en las organizaciones, en la mayoría de los artículos se plantea que existe el riesgo de obtener un análisis deficiente, ya que, solo se verán beneficios si se implementa correctamente, es por esto, que ésta esta investigación busca conocer la integración de estas dos disciplinas, en el entorno empresarial.

Con respecto a las metodologías KDD, SEMMA y CRISP-DM, se analiza qué KDD está orientado a la identificación de patrones más favorables para cierta tarea, es el más complejo de implementar ya que tiene varias fases a desarrollar, SEMMA se orienta al desarrollo del proceso de MD o minería de datos, es simple y ágil y CRISP se orienta a los objetivos empresariales, es el menos complejo de entender y aplicar, cuenta con una curva de adaptabilidad muy amplia para cualquier desarrollador [9].

Para mitigar los riesgos en los procesos de negocios se usa la gestión por procesos de negocio, ya que es un proceso cíclico la metodología se enfoca en conseguir la mejora continua de la organización a través de procesos de negocios alineados con la estrategia definida que buscará conseguir uno o varios de los beneficios expuestos anteriormente. Tanto la estrategia como sus procesos son dinámicos, por lo tanto, debe existir agilidad, preparación y atención para hacer frente a los cambios del entorno (clientes, competencia, normativas, etc.), por medio de esta disciplina es más factible solucionar los inconvenientes analizados, ya que, BPM tiene un enfoque más amplio, teniendo en cuenta los recursos, permitiendo de esa manera encontrar soluciones a las problemáticas empresariales.

Podemos afirmar que algunos modelos profundizan en mayor detalle sobre las tareas y actividades a ejecutar en cada etapa del proceso de minería de datos (como CRISP-DM) requiriendo un conocimiento previo de las características de la organización, sus objetivos, las necesidades y los intereses que permitan tener claridad durante el proceso de cómo alcanzar el cumplimiento de estos propósitos, mientras que otros modelos proveen solo una guía general del trabajo a realizar en cada fase, como KDD o SEMMA.

En la actualidad a nivel mundial y nacional se han reportado altos índices de creación de empresas, pero también se ha registrado un alto porcentaje en la deserción, cierre o liquidación de estas, como en la ciudad

de Tunja, según las cifras brindadas. Por la Cámara de Comercio de Tunja, se observó que en 2020 y 2021, entre las cifras de las empresas creadas en estos años y las cerradas, se demostró que el 60% de las empresas están cerradas. De acuerdo con estas preocupantes cifras a nivel nacional, la Cámara de Comercio de Bogotá y la Dirección de Estudios e Investigaciones realizaron varios estudios y reflejaron que el cierre causal de estas Pymes es generado por riesgos económicos, competencia y experiencia en el área/sector.

De acuerdo a las causas mencionadas en el documento, se evidencia que las empresas han sido cerradas ya que no pueden identificar los posibles riesgos que puedan presentar a futuro, a través del comportamiento de los clientes, ventas, ingresos, gastos, la falta de conocimiento sobre cómo mantener la empresa y no tener ni utilizar ninguna herramienta que les ayude a identificar o predecir estos riesgos de su pyme, se ven obligados a liquidarla.

Por tal motivo, surge la necesidad de implementar una herramienta informática que evalúe los riesgos asociados a la gestión por procesos, que evalúe el impacto de los riesgos del negocio, con el fin de reducir los tiempos en la detección e identificación de riesgos y generar un plan de mejora. Para este proyecto se realizará la adaptación del modelo Pyme el cual tendrá una mezcla de un sistema de información y un sistema de predicción, en el cual se vio la necesidad de realizar aportes desde un desarrollo informático el cual estará conformado por dos principales componentes, el primero enfocado a la gestión y evaluación de riesgos y el segundo al diagnóstico y predicción de riesgos.

Una de las características que tendrá la herramienta será evaluar el riesgo para que el usuario pueda visualizar fácilmente los tipos de riesgos que se presentan en la empresa y que la aplicación logre un alto porcentaje de usabilidad, siendo intuitiva para el usuario. Esta herramienta se desarrollará con la posibilidad de predecir riesgos a través de un algoritmo de aprendizaje basado en los datos proporcionados por las Pymes.

La gestión de riesgos es de gran relevancia a la hora de mejorar los procesos de negocio, por ello, cada vez son más las empresas que involucran estas metodologías. ERM es un enfoque integrado que aumenta el valor de la organización mediante la reducción de las incertidumbres inherentes al enfoque convencional, la reducción de la volatilidad de la rentabilidad de las acciones, la estabilización de las ganancias, la mejora de la eficiencia del capital y la reducción de los costos esperados del capital externo y la inspección regulatoria de inversiones, y maximiza el valor para los accionistas [58]. El objetivo de esta gestión del riesgo es lograr una maduración continua, pasando de ser un método defensivo a uno ofensivo y calculado [46]. Esto genera un mayor conocimiento de la competencia y del potencial de la entidad, permitiendo un continuo ajuste de inconsistencias o el mayor uso de buenas prácticas y así generando una competencia continua en base a la estrategia, que lleve a la apertura de más empresas y al mantenimiento de estas.

De acuerdo con el estado del arte y los vacíos identificados en los artículos y trabajos científicos, se identificaron los siguientes: hacer un mayor uso de la computación en la nube, como lo indica el proyecto, [50]. Puede tentar a la posibilidad de migrar a la nube, lo que sin duda traerá grandes beneficios a la organización para el desarrollo de sus modelos como se ve actualmente en muchas organizaciones, se refleja, además, la importancia de gestionar la nube para estos procesos. La aplicación a todo tipo de empresas, como se evidencia en [50], el módulo de predicción de riesgos no aplica a las Pymes, solo a las macroempresas. Cada empresa y sector se desarrolla de manera diferente; Uno de los vacíos científicos presentes en varios productos es la gran variedad de procesos y campos de negocio, lo que conduce a cierta exclusividad en el desarrollo de sistemas de gestión de riesgos, como se evidencia en [51].

Limitaciones de la investigación

- Los modelos no previenen los riesgos, solo actúan en consecuencia cuando su probabilidad de ocurrencia excede un umbral de tolerancia, solo aborda los riesgos relacionados con el proceso, es decir, datos de entrada y salida de la tarea, recursos asignados y rendimiento del tiempo, no garantiza una solución óptima debido al límite de tiempo que imponen una programación lineal.
- Podría profundizarse el papel de la minería de procesos como motor de sistemas expertos mediante la expansión de la metodología a la auditoría de sistemas informáticos en línea, que permita contextualizar

y mejorar la clasificación de las no conformidades considerando las especificidades del contexto en el que se lleva a cabo la auditoría.

- Algunos artículos no son de libre acceso, porque lo que no fue posible incluirlos en la revisión bibliográfica.

REFERENCIAS

- [1] Barafort B. et al. (2019). ISO 31000-based integrated risk management process assessment model for IT organizations. *J. Softw. Evol. Process* 31(1).
- [2] AEC. (2022). Riesgos de negocios. Recuperado: <https://www.aec.es/web/guest/centroconocimiento/riesgos-denegocio#:~:text=Es%20la%20posibilidad%20de%20%20los%20que%20se%20operan>
- [3] CVN. (2022). Cuáles son los sectores económicos de Colombia. Recuperado: <https://www.cvn.com.co/admincvn/cuales-sonlos-sectores-economicos-de-colombia/>
- [4] DAFP. (2011). Guía para la administración del riesgo. Recuperado: <https://www.funcionpublica.gov.co/documents/418537/506911/1592.pdf/73e5a159-2d8f-41aa8182-eb99e8c4f3ba>
- [5] ICONTEC. (2008). Norma Técnica Colombiana NTC 5254. Icontec.
- [6] Hasper J. et al. (2017). Trends in business risk management research: A bibliometric análisis. *Rev. Venez. Gerenc.* 22(79), 506-524, 2017.
- [7] Sánchez Y. (2021). Procedure to determine the impact of risk management on the sustainability of organizations. *Dir. y Organ.* 73, 39-49.
- [8] DANE. (2022). Contexto macroeconómico de Colombia. DANE.
- [9] Nitola N. (2010). Cuadro Comparativo KDD VS SEMMA VS CRISP. Recuperado: <https://es.scribd.com/document/503867448/cuadro-comparativo-KDD-VS-SEMMA-VS-CRISP>
- [10] Sandoval M. (2019). Análisis comparativo de metodologías para la gestión de proyectos de minería de datos. Recuperado: <https://docplayer.es/92672227-Analisis-comparativo-de-metodologias-para-la-gestion-de-proyectos-de-mineria-de-datos.html>
- [11] Salud Electrónica. (2021). Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos - KDD. Recuperado: <https://saludelectronica.com/descubrimiento-de-conocimiento-en-bases-de-datos-kdd/>
- [12] Fayyad U. y Stolorz P. (1997). Data mining and KDD: Promise and challenges. *Future Generation Computer Systems* 13(2-3), 99-115.
- [13] Peralta C. (2014). proceso de conceptualización del entendimiento del negocio para proyectos de explotación de información. Recuperado: https://www.researchgate.net/figure/Dinamica-general-de-la-metodologia-SEMMA-7-En-7-se-describen-las-fases-de-la_fig4_284215308
- [14] Gavilán I. (2021). Metodología para Machine Learning (III): SEMMA. Recuperado: <https://ignaciogavilan.com/metodologia-para-machine-learning-iii-semma/>
- [15] Hotz N. (2021). What is CRISP DM? Recuperado: <https://www.datascience-pm.com/crisp-dm-2/>
- [16] IBM. (2021). Conceptos básicos de ayuda de CRISP-DM. Recuperado: <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/SaaS?topic=dm-crisp-help-overview>
- [17] IIC. (2009). La metodología CRISP-DM en ciencia de datos. Instituto de Ingeniería del Conocimiento.
- [18] León E. (2010). Minería de Datos. Recuperado: https://disi.unal.edu.co/~eleonguz/cursos/md/presentaciones/Sesion5_Metodologias.pdf
- [19] Andi. (2017). Ranking de las empresas más innovadoras de Colombia. Recuperado: <https://imsampedro.com.co/blog/ranking-de-las-empresas-mas-innovadoras-de-colombia/>
- [20] Calle J. (2021). La importancia de reducir los costos de transacción. Recuperado: <https://www.asuntoslegales.com.co/analisis/jose-miguel-de-la-calle-510741/la-importancia-de-reducir-los-costos-de-transaccion-3199000>
- [21] Duarte J. (2022). Factores determinantes y críticos en empresas de servicios, para la obtención de ventajas competitivas sostenibles y transferibles a estrategia de Globalización: Un análisis de la industria del software. Recuperado: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3957/jlhc1de1.pdf>
- [22] Erbes A. (2019). Industria 4.0: Oportunidades y desafíos para el desarrollo productivo de la provincia de Santa Fe. Recuperado: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44954/1/S1901011_es.pdf
- [23] Jiménez J. (2020). La falta de planificación tiene serias consecuencias negativas. Recuperado: <https://www.ampliatuopportunities.com/falta-de-planificacion/>
- [24] Koneggui. (2019). ¿Qué consecuencias tiene un mal inventario de una empresa? Recuperado: <https://koneggui.com.ec/blogiso/blog-inventarios/que-consecuencias-tiene-un-mal-inventario-de-una-empresa>
- [25] Luja P. (2014). El individualismo como elemento que influye en la vida y configuración de la ciudad. Recuperado: <https://www.redalyc.org/pdf/4779/477947303004.pdf>
- [26] Luzardo I. (2021). ¿Está realmente estancada la productividad en Colombia? Recuperado: <https://contextomedia.com/esta-realmente-estancada-la-productividad-en-colombia/>

- [27] Pérez E. (2018). La inclusión financiera para la inserción productiva y el papel de la banca de desarrollo. Recuperado: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44213/1/S1800568_es.pdf
- [28] Villamizar C. (2014). Manejo del liderazgo en la empresa. Recuperado: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/12757/MANEJO%20DEL%20LIDERAZGO%20EN%20LA%20EMPRESA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [29] Córdoba R. (2021). Productividad: la clave del crecimiento para Colombia. Recuperado: <https://compite.com.co/proyecto/productividad/>
- [30] Díaz E. (2021). Evolución de las pymes en Colombia y el impacto de la Pandemia. Recuperado: <https://escuelaici.com/2021/05/31/evolucion-de-las-pymes-en-colombia-y-el-impacto-de-la-pandemia/>
- [31] López E. (2021). La pandemia detona la evolución de las pymes a empresas conscientes. Recuperado: <https://elempresario.mx/emprendedores/pandemia-detona-evolucion-pymes-empresas-conscientes>
- [32] Romero I. (2006). Las PYME en la economía global. Hacia una estrategia de fomento empresarial. Recuperado: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362006000300003
- [33] Quintero J. (2018). Las Pymes en Colombia y las barreras para su desarrollo y perdurabilidad. Recuperado: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17949/QuinteroReatigajuanSebastian2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [34] BANCOLDEX. (2021). Pymes: Su importancia y datos que debes saber. Recuperado: [https://www.jelpit.com/blog/empresas/emprendimiento/pymes-en-colombia-todo-lo-que-debes-conocer/#:~:text=%E2%80%9CEI%20t%C3%A9rmino%20pyme%20hace%20referencia,\(S.M.M.L.V.\)%2C%20afirma%20Bancoldex](https://www.jelpit.com/blog/empresas/emprendimiento/pymes-en-colombia-todo-lo-que-debes-conocer/#:~:text=%E2%80%9CEI%20t%C3%A9rmino%20pyme%20hace%20referencia,(S.M.M.L.V.)%2C%20afirma%20Bancoldex)
- [35] BANCOLOMBIA. (2018). Conoce todo sobre las pymes en Colombia. Obtenido de https://www.bancolombia.com/negocios/actualizate/legal-y-tributario/todo-sobre-las-pymes-en-colombia?gclid=Cj0KCQiArenfBRCoARIsAFc1FqdXAKwxkCqFntARINDHCqfbxN6ES93_dWqK
- [36] Ortega C. (2014). ¿Cuál es la importancia de las pymes en la economía colombiana? Recuperado: <https://www.pymas.com.co/ideas-para-crecer/mundo-pyme/la-importancia-de-las-pymes-en-colombia>
- [37] FINTECH. (2021). El 62% de las pymes colombianas no tiene acceso a financiamiento. Recuperado: <https://colombiafintech.co/lineaDeTiempo/articulo/el-62-de-las-pymes-colombianas-no-tiene-acceso-a-financiamiento>
- [38] Mincomercio. (2021). Colombia: El cuarto país con mayor tasa de actividades emprendedoras en el mundo. Recuperado: <https://innpulsacolombia.com/innformate/colombia-el-cuarto-pais-con-mayor-tasa-de-actividad-emprendedora-en-el-mundo>
- [39] República L. (2020). Affirmatum les ayuda a empresas a hacer pagos anticipados a pymes y sus proveedores. Obtenido de <https://www.larepublica.co/finanzas/affirmatum-les-ayuda-a-empresas-a-hacer-pagos-anticipados-a-pymes-y-sus-proveedores-2958698>
- [40] DANE. (2022). Encuesta de Micronegocios. Recuperado: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/micronegocios>
- [41] Tributario E. (1989). Estatuto Tributario. Recuperado: <https://www.mincit.gov.co/ministerio/normograma-sig/procesos-misionales/facilitacion-del-comercio-y-defensa-comercial/decretos/1967-1990/decreto-624-de-1989-2.aspx>
- [42] IBM. (2020). Business Process Management. Recuperado: <https://www.ibm.com/co-es/cloud/learn/business-process-management>
- [43] Andrews R. et al. (2020). Quality-informed semi-automated event log generation for process mining. *Decision Support Systems* 132, 113265.
- [44] de Oliveira U. et al. (2021). Risk management applied to the reverse logistics of solid waste. *Journal of Cleaner Production* 296.
- [45] di Ciccio C. et al. (2018). Blockchain-Based Traceability of Inter-organisational Business Processes. En 8th International Symposium on Business Modeling and Software Design, BMSD. Springer.
- [46] Feng S. et al. (2021). A general and transferable deep learning framework for predicting phase formation in materials. *Npj Computational Materials* 7(1).
- [47] Gheibi O. et al. (2021). Applying Machine Learning in Self-adaptive Systems. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems* 15(3).
- [48] Karanja E. (2017). Does the hiring of chief risk officers align with the COSO/ISO enterprise risk management frameworks? *International Journal of Accounting and Information Management* 25(3), 274–295.
- [49] Lamine E. et al. (2019). BPRIM: An integrated framework for business process management and risk management. *Computers in Industry* 113.
- [50] Liu X. et al. (2021). Characterizing key agents in the cryptocurrency economy through blockchain transaction analysis. *EPJ Data Science* 10(1).
- [51] Nicolò D. (2020). Blockchain and Management Accounting Systems Based on Information Sharing. *Studies in Systems, Decision and Control* 288, 23-29. Springer.

Modelo conceptual para el estudio de la relación entre las habilidades blandas del director de proyectos y el éxito de la gerencia de proyectos de consultoría ambiental

Andrea Echeverry-Zuleta¹

Daniel A. La Rotta-Forero²

Argenis Gamboa Santos³

Universidad de Antioquia

Colombia

Las capacidades y habilidades de los directores de proyectos se consideran como uno de los factores de éxito de la gerencia de proyectos y de los proyectos en sí. En este capítulo se describe un modelo conceptual para el estudio de las relaciones entre las habilidades blandas HBs del director de proyectos y el éxito de la gerencia de proyectos GdP en el campo de la consultoría ambiental. Para tal fin se diseñó un estudio mixto secuencial no experimental, transversal, explicativo-asociativo, retrospectivo. De la fase cualitativa se obtuvo un modelo teórico resultado de la conceptualización y operacionalización de las habilidades blandas a partir de la literatura. La fase cuantitativa consistió en la validación empírica del modelo mediante una encuesta aplicada a líderes y miembros de grupos de investigación de la Universidad de Antioquia, Colombia, que realizan consultoría ambiental. La validación dio como resultado un constructo conformado por 9 dimensiones de HBs y 29 ítems. El análisis de la relación entre las HBs y la GdP arrojó que la negociación y la comunicación son habilidades del director de proyectos que inciden, en mayor relación que otras, en el éxito de la GdP. Este trabajo es exploratorio, por lo que se requiere estudios en poblaciones similares que confirmen los modelos propuestos.

¹ Ecóloga de Zonas Costeras y Estudiante de Maestría en Gerencia de Proyectos.

Contacto: andreaezu@gmail.com

² Ingeniero Industrial y Magíster en Ingeniería Industrial.

Contacto: daniel.larotta@udea.edu.co

³ Ingeniero de Sistemas y Estudiante de Maestría en Gerencia de Proyectos.

Contacto: ing.gamboasantos@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La gerencia de proyectos GdP, definida por [1] como la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir los requisitos del mismo, se ha convertido en un requisito clave en numerosas organizaciones para el mejoramiento de la eficiencia y la eficacia de sus operaciones [2] y, por consiguiente, juega un papel importante en la planeación y asignación de recursos para el cumplimiento de metas específicas [3, 4].

La GdP se centra en el desarrollo de herramientas y procesos orientados hacia la consolidación de un evento de trabajo único, un proyecto, el cual está definido cronológicamente teniendo en cuenta un presupuesto y control de calidad específicos [5], así como una ética de la virtud que guie el juego limpio en contexto de gestión complejos [6]. En este sentido, la GdP debe identificar objetivos claros y viables, y equilibrar la triple restricción, es decir, la nivelación de las demandas contingentes de calidad, tiempo y costo en contextos cada vez más complejos [7].

Los factores que componen el llamado triángulo de oro (también llamado triángulo de hierro) o la triple restricción, costo, calidad y tiempo, han demarcado el éxito de la GdP [5, 8, 9]. No obstante, es importante diferenciar dos componentes o conceptos en cuánto a éxito de la GdP: 1) del proyecto, el cual se refiere al impacto o efecto del producto final del proyecto y es medido en relación con el logro de los diferentes objetivos del proyecto; y 2) de la gerencia del proyecto, que se enfoca en la manera como los procesos de la gerencia de proyectos son llevados a cabo, en particular, en el logro exitoso de los objetivos en cuánto a costo (presupuesto), tiempo (cronograma) y calidad [4, 5].

El director de proyecto es la persona que ha de integrar los esfuerzos internos y externos de la organización y enfocarlos para alcanzar el éxito del proyecto. Este debe contar con las competencias de conocimiento sobre dirección de proyectos, desempeño y eficacia personal como complemento a las habilidades específicas de un área y las competencias generales en materia de gestión requeridas para el proyecto [1]. Estudios de la disciplina de la GdP revelan la importancia de las competencias y el desempeño del director de proyecto como uno de los factores de éxito de un proyecto [10-12].

Por ello, los estándares internacionales para la gerencia de proyectos recomiendan las competencias que deben desarrollar los directores de proyectos, tanto técnicas (habilidades duras) como humanas, interpersonales o sociales (habilidades blandas); no obstante, dichos estándares enfatizan en las competencias técnicas [12-17].

Las habilidades blandas HBs son las habilidades no técnicas del director del proyecto que concierne con la administración y trabajo de las personas y el fomento de las relaciones organizacionales externas e internas [18]. Estudios referenciados por [14, 18-20] evidencian que las HBs del director de proyecto han sido consideradas como factor de éxito en la gerencia de proyectos desde la década de los ochenta.

Asimismo, los trabajos de [10, 11, 17, 21] no solo muestran la relevancia de las HBs en la gerencia de proyectos en diferentes áreas sino, también, el incremento de estudios en esta temática.

En Colombia, los estudios de gerencia de proyectos se ubican principalmente en los sectores de innovación [22], construcción [23], y tecnología de la información [24] y han tendido a enfocarse más hacia la componente técnica de la gerencia de proyectos que hacia el rol o las habilidades del director de proyectos. En el escenario de proyectos de consultoría ambiental, el avance teórico de la GdP ha sido menos evidente, y se carece de una base teórica para entrar a confirmar la validez de la relación de las HBs del director de proyectos con el éxito de la gerencia de dichos proyectos.

El presente trabajo busca aportar al desarrollo teórico de la GdP en Colombia, procurando dar respuesta al siguiente interrogante ¿Qué modelo conceptual sirve de base teórica para el estudio de las relaciones entre las habilidades blandas del director del proyecto y el éxito de la GdP de consultoría ambiental realizados por grupos de investigación de la Universidad de Antioquia?

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Las HBs en la dirección de proyectos

El término HBs fue acuñado por [21] para describir todas aquellas habilidades interpersonales que contribuyen a una alta eficiencia en la ejecución del factor humano relacionado con los procesos de la GdP, y concluyeron que no existe unanimidad en cuanto al uso del concepto por parte de diferentes autores.

Por ejemplo, constataron que las mismas HBs son referenciadas en varios estudios con términos como: factores blandos, habilidades interpersonales, habilidades de gente, habilidades personales, habilidades sociales, habilidades comportamentales, habilidades humanas, entre otras. Un factor común es que los autores usan dichos términos para describir todos o parte de los aspectos que tienen que ver con la calificación del personal del proyecto, el comportamiento social en los conflictos, la motivación hacia el trabajo y el estilo de administración.

Más recientemente, [10] hacen referencia a las HBs como el conjunto de competencias personales que reflejan el comportamiento del director de proyecto durante la realización de actividades, incluyendo elementos de la actitud del director de proyecto y características de la personalidad [25]. Las habilidades y competencias del director de proyectos son un factor de éxito, tanto para el proyecto como para la GdP [10-12, 14, 15, 26], por lo que el fortalecimiento del rol de director de proyectos cobra relevancia dentro de la GdP y la gestión de beneficios de los proyectos [27]. En este trabajo, las HBs se entienden como el conjunto de comportamientos, actitudes y características intangibles propias de la personalidad del director de proyectos, que inciden en la gestión y el trabajo con las personas.

En algunos estudios en torno al director de proyectos se han elaborado diferentes modelos teóricos con el propósito de: 1) identificar la relación de las habilidades duras y las HBs del director de proyectos con el desempeño del proyecto [18]; 2) mostrar la incidencia de los rasgos de personalidad del director de proyectos en el éxito del proyecto teniendo la dinámica organizacional como moderador de estas variables [14]; 3) representar las competencias específicas de los directores de proyectos de desarrollo internacional en organizaciones no gubernamentales ONG [11]; y 4) mapear, evaluar y desarrollar procesos para la competencia de los directores de proyectos y practicantes en un contexto organizacional [17].

Estos estudios han tenido en común la construcción de un modelo a partir de revisiones de literatura y metodologías indagatorias (e.g. el método de incidentes críticos o análisis de contenido), con una validación del mismo mediante encuestas o entrevistas aplicadas a practicantes de la dirección de proyectos, principalmente directores de proyecto. Otros estudios se han desarrollado mediante análisis de contenido de la literatura de dirección de proyectos y de los anuncios laborales para directores de proyectos, a fin de identificar las competencias más demandadas en esta disciplina [10, 21].

2.2 Éxito de la dirección de proyectos

El éxito en la disciplina de la gerencia de proyectos es un concepto ampliamente estudiado y su definición en la práctica depende tanto de los criterios y factores de éxito [28] como del contexto del proyecto, por lo que es complejo encontrar un concepto de éxito de proyecto universal [12, 29].

Teniendo en cuenta que la medición del éxito del proyecto se hace principalmente con referencia a su terminación dentro de las restricciones alcance, tiempo, costo, calidad, recursos y riesgos, [9] señalan las habilidades y competencias del director de proyectos, la estructura organizacional, los sistemas de medidas y las prácticas gerenciales que representan una cultura organizacional, como las dimensiones de las cuales depende el éxito de la GdP.

A su vez, define como factor de éxito de los proyectos las prácticas formales de la gerencia de proyectos, las habilidades y competencias del director de proyectos y otros miembros del equipo, la cultura organizacional, la buena comunicación y el apoyo de la alta gerencia. En este trabajo, se toma el éxito de la GdP como el logro de los objetivos dentro del alcance, el presupuesto, el tiempo y la calidad esperados.

2.3 Consultoría ambiental

La consultoría es un servicio de asesoramiento profesional que ayuda a los gerentes y a las organizaciones a alcanzar los objetivos y fines de la organización, mediante la solución de problemas gerenciales y empresariales, el descubrimiento y la evaluación de nuevas oportunidades, el mejoramiento del aprendizaje y la puesta en práctica de los cambios [30].

[31] define a la industria de bienes y servicios ambientales como aquella que produce bienes y servicios para medir, prevenir, limitar, minimizar o corregir el daño ambiental al agua, aire y suelo, así como los problemas relacionados con residuos, ruidos y ecosistemas.

Con base en lo anterior, la consultoría ambiental puede ser definida como aquel servicio orientado a dar elementos a los planificadores y tomadores de decisiones, tanto del sector público como privado, para proteger al ambiente de las consecuencias adversas del desarrollo. [32] define como primeros prestadores de servicios de consultoría ambiental a las firmas de ingeniería e instituciones académicas/investigativas.

En este trabajo, una consultoría ambiental es un proyecto cuyo resultado único se convierte en un aporte a la solución de problemas o requerimientos ambientales.

3. MÉTODO

La metodología de este estudio consistió en un proceso mixto secuencial basado en el método propuesto por [33] compuesto de dos fases, una cualitativa y otra cuantitativa.

La fase cualitativa del estudio tendió a la conceptualización de las HBs y del éxito de proyectos partiendo de la revisión de literatura. A partir de esta elaboración conceptual se desarrolló un modelo para la operacionalización de las HBs de los directores de proyectos y su impacto en el éxito de la GdP.

La fase cuantitativa consistió en la validación empírica del modelo generado mediante la aplicación de una encuesta a directores de proyectos y miembros de proyectos de consultoría ambiental de la Universidad de Antioquia. La Figura 1 describe el desarrollo metodológico del trabajo realizado.

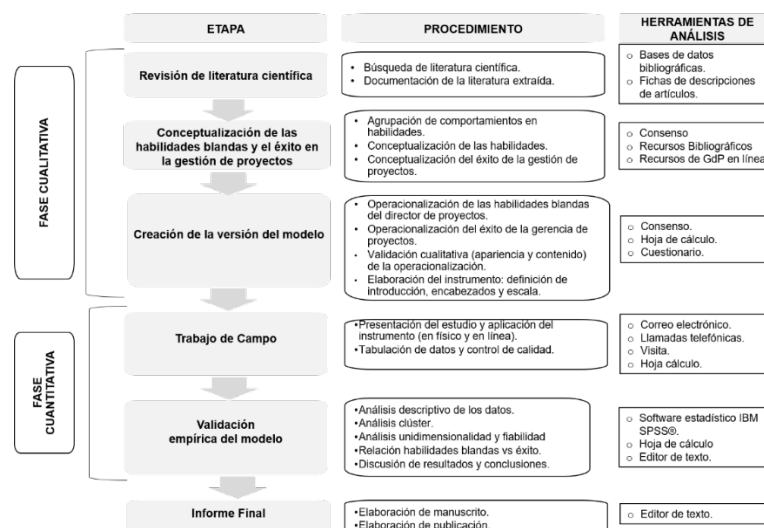


Figura1. Etapas, procedimientos y herramientas del estudio

3.1 Fase cualitativa

3.1.1 Revisión de literatura

La revisión de literatura se realizó mediante una estrategia de búsqueda que consistió en: 1) priorizar los términos *soft skills*, *project management* y *project manager* como términos de búsqueda; 2) limitar la

búsqueda a artículos de revista, artículos en prensa, revisión bibliográfica y artículos de conferencias; y 3) proponer algoritmos a aplicar en la base de datos, validando que fueran pertinentes para el objetivo de búsqueda propuesto.

La estrategia de búsqueda arrojó 48 artículos obtenidos con el algoritmo (TITLE ("soft skills") AND TITLE-ABS-KEY ("project management" OR "project manager")) OR (TITLE-ABS-KEY ("soft skills") AND TITLE ("project management" OR "project manager")) AND DOCTYPE (ar OR cp OR ip). Este se consideró ser el algoritmo más apropiado porque realizó una búsqueda amplia sin salirse del tema de la investigación y arrojando los resultados más pertinentes según el criterio de calidad y pertinencia definido.

Los artículos encontrados fueron organizados por relevancia según contenían información sobre medición, identificación, relación o correlación de las HBs en la gestión de proyectos (criterio de calidad y pertinencia). De los 48 artículos, 16 cumplieron el criterio y fueron caracterizados a fin de conocer qué HBs se han estudiado en la gerencia de proyectos, modelos propuestos, metodologías aplicadas, escalas, ejemplos de operacionalización. En la caracterización se identificaron 6 modelos de HBs y varios listados de habilidades y competencias de los directores de proyectos que sirvieron de punto de partida para la conceptualización.

3.1.2 Conceptualización de las HBs y el éxito de la GdP

La conceptualización de las HBs tuvo como base un inventario de habilidades extraídas de los trabajos de [21, 34], estudios clasificados como relevantes en la revisión de literatura. Ambos trabajos presentan modelos que relacionan las HBs en proyectos, el primero propone un modelo mental de procesos del factor humano en la gestión de proyectos y el segundo presenta competencias de los directores de proyectos organizadas por categorías e identificación de la relevancia de unas u otras en los procesos de la GdeP. Esta conceptualización se realizó definiendo cada una de las habilidades y cada uno de los comportamientos asociados a ellas, mediante el uso de recursos bibliográficos físicos y en línea del área de administración y de gestión de recursos humanos, y con connotación en la GdP.

Cada una de las definiciones de la conceptualización fueron validadas mediante un consenso con especialistas. Posteriormente, se hizo un control de calidad donde se revisó que efectivamente las definiciones de las habilidades, dimensiones, y los comportamientos asociados a estas (incidentes críticos) si correspondían entre sí y que no faltasen comportamientos a tener en cuenta. Se verificó que no hubiese redundancia entre los comportamientos, se precisó la definición de los mismos y, por último, se analizó la composición de las habilidades. La Figura 2 presenta de manera gráfica el resultado de la conceptualización de las 7 HBs que podían incidir en el éxito de GdP obtenido, y en la Tabla 1 se expone la conceptualización de una de ellas a fin de ilustrar el trabajo realizado.



Figura 2. Modelo conceptual habilidades blandas en la gestión de proyectos

Tabla 1. Conceptualización de la habilidad blanda Negociación

Dimensión	Definición de la dimensión	Incidente crítico	Definición del incidente
Negociación	Habilidades involucradas en el proceso por el que dos o más individuos o grupos, teniendo ambos metas comunes y en conflicto, presentan y discuten propuestas en un intento por llegar a un acuerdo.	Argumentador	Persona con la habilidad de convencer a otros mediante razones, evidencias y fundamentos lógicos.
		Mediador	Persona con la habilidad para hacer que las personas lleguen a acuerdo en ocasiones de conflicto.
		Seguro	Persona que tiene confianza en sí mismo, en sus habilidades y conocimientos.
		Arbitro	Persona con la habilidad de analizar los puntos de vista de las partes involucradas en un conflicto y de tomar la decisión adecuada para resolverlo.

La conceptualización del éxito en la gestión de proyectos partió de la visión clásica donde el éxito de la GdP está demarcada por la triple restricción, complementada con los elementos que [1] define para la gestión del costo, calidad y tiempo.

3.1.3 Creación de la primera versión del modelo

La operacionalización de las HBs consistió en definir oraciones para cada comportamiento conceptualizado de modo que hicieran alusión específica a la implementación del mismo por parte del director de proyectos y en función de la práctica en el día a día para así hacerlos medibles. En las Tablas 2 y 3 se ilustra la forma que se operacionalizaron las HBs y la operacionalización del éxito, respectivamente.

Tabla 2. Operacionalización de la habilidad blanda Negociación

Habilidad	Comportamiento	Ítem
Negociación	Argumentador	Convencer a otro mediante razones, evidencias y fundamentos lógicos
	Mediador	Hacer que las personas lleguen a acuerdo en ocasiones de conflicto
	Seguro	Mostrar confianza en sí mismos, en sus habilidades y conocimientos.
	Arbitro	Analizar puntos de vista de las partes involucradas en un conflicto y tomar decisiones para resolverlo. (Arbitrar)

Tabla 3. Operacionalización del éxito de la GdP

Variable	Ítem
Alcance	Los proyectos que ha coordinado/dirigido que tan frecuente cumplen con el alcance propuesto
Calidad	Los proyectos que ha coordinado/dirigido que tan frecuente cumplen con la calidad del proyecto
Costo	Los proyectos que ha coordinado/dirigido que tan frecuente cumplen con los costos proyectados
Tiempo	Los proyectos que ha coordinado/dirigido que tan frecuente cumplen con el cronograma planeado
Éxito en general	En términos generales la gestión de los proyectos en los que ha participado/dirigido ha sido exitosa

La operacionalización fue sometida a un proceso de validación cualitativa de apariencia y contenido interna (discusión grupal) y externa (evaluación por especialistas), partiendo de una propuesta adaptativa de [35] usando los criterios: comprensible, variación, precisión, viabilidad y justificable.

La Figura 3 presenta el modelo resultado del trabajo cualitativo. Se observa el constructo resultado de la conceptualización y operacionalización donde se relaciona el éxito, representado como única dimensión con 5 ítems, con las HBs conformada por 7 dimensiones y 59 ítems.

La operacionalización de las dimensiones e ítems que componen la Figura 3 permitió la elaboración del cuestionario para la validación del modelo. Este fue estructurado en tres partes, la primera indagaba por los criterios de éxito del proyecto (alcance, calidad, cronograma y costo), la segunda por la GdP en términos generales y la tercera por el comportamiento del director del proyecto; todas dirigidas al último proyecto en que el respondiente había participado.

En consonancia con las preguntas formuladas, se definieron las siguientes tres medidas en una escala Likert de 5: 1) Escala de cumplimiento para medir las variables relacionadas con los criterios de éxito (1. No se cumplió en absoluto, 5. Se cumplió por completo); 2) escala de éxito para la variable relacionada con el éxito general del proyecto (1. Nada Exitosa, 5. Muy exitosa); y 3) Escala de nivel para las variables relacionadas con las habilidades blandas del director del proyecto (1. Muy bajo nivel), 5. Muy alto nivel).

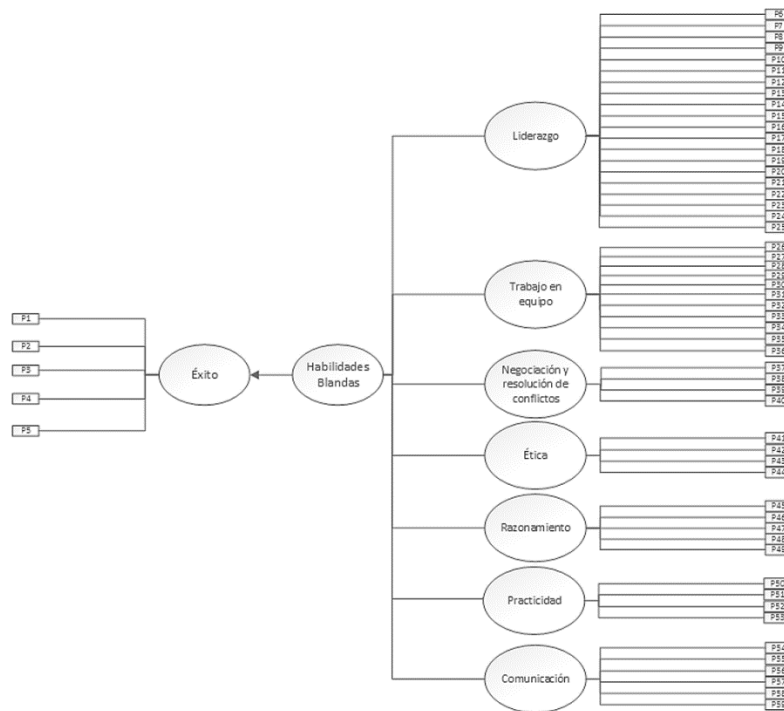


Figura 3. Modelo inicial que relaciona las HBs y el éxito de la GdP

3.2 Fase cuantitativa

3.2.1 Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en la aplicación de una encuesta a los integrantes de 20 grupos de investigación de la Universidad de Antioquia que realizan consultoría ambiental y en la tabulación de los datos obtenidos. La encuesta se aplicó tanto en físico como en línea y se tabuló en hoja de cálculo. Los datos obtenidos de las encuestas físicas fueron integrados con los obtenidos del instrumento en línea. Se aplicó un control de calidad a la tabulación mediante la revisión una a una de los resultados de las encuestas físicas, pues las recibidas en línea generaron los datos automáticamente.

3.2.2 Validación empírica del modelo

La validación empírica del modelo consistió en el análisis de los datos obtenidos en campo y tratamiento estadístico de estos con el software IBM SPSS Statistics®.

Se realizó un análisis descriptivo para el conocimiento de la muestra y el planteamiento de supuestos sobre las posibles relaciones entre las variables. Los procedimientos utilizados fueron: medidas de frecuencia, medidas de tendencia central (media, mediana, moda), medidas de dispersión (rango, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimo y máximo) y medidas de distribución (cuartiles 1 y 3, asimetría y curtosis).

El modelo fue sometido a un análisis de validación exploratoria mediante análisis de clúster de los datos obtenidos. Este análisis es una técnica estadística multivariada, de carácter exploratorio, que busca agrupar ítems (o variables) intentando lograr la máxima homogeneidad posible en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos.

El modelo resultante del análisis clúster fue validado mediante un análisis de unidimensionalidad y fiabilidad. La unidimensionalidad significa que un conjunto de ítems son la base de un rasgo latente o constructo (dimensión) [36]. La fiabilidad, medida mediante el Alfa de Cronbach, asume que los ítems miden un mismo constructo y que están altamente correlacionados entre sí [37], este valor oscila entre 0 y 1 y cuanto mayor sea el valor mayor será la fiabilidad de la escala. Con este análisis se pretendió validar que el modelo resultado del estudio muestra unidimensionalidad y que sus puntuaciones representan un solo factor dominante.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Análisis de la unidimensionalidad y la fiabilidad del éxito en la GdP

Dado que el modelo a proponer presenta la relación de las HBs con el éxito de la GdP, en la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos del análisis de unidimensionalidad y fiabilidad a las variables correspondientes a los criterios de éxito del proyecto, lado izquierdo del modelo.

Tabla 4. Resultados del análisis de la unidimensionalidad y fiabilidad del éxito en la GdP

Dimensión	Ítem	Media	Desviación estándar	Cargas factor	Cronbach si se elimina	Alfa de cronbach	% varianza explicada	Ratio
Éxito	P1	4,459	0,691	0,894	0,728	0,801	65,388	5,201
	P2	4,622	0,639	0,893	0,746			
	P3	4,027	0,986	0,680	0,705			
	P4	4,324	0,915	0,178	0,820			

Los datos presentados en la Tabla 4 muestran que todos los ítems de la dimensión fueron fiables y tuvieron consistencia interna, pues todos tuvieron un Alpha de Cronbach, superior a 0,7. No obstante, en cuanto a la unidimensionalidad del constructo, el ítem que se relaciona con el criterio de presupuesto (P4), mostró una carga inferior a 0,55, es decir, no significativa.

Lo anterior llevó a suponer que el éxito en la GdP se divide en dos dimensiones, una medida por los ítems P1, P2 y P3 que corresponden a alcance, calidad y cronograma, respectivamente, y que se denominó éxito no financiero; y la otra medida por el ítem P4, relacionada con el costo y que se denominó éxito financiero. En la Figura 4 se muestra el modelo propuesto para el éxito de la GdP a partir de este análisis.

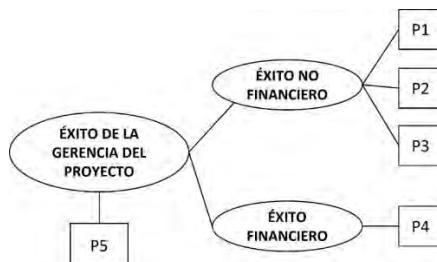


Figura 4. Modelo para la operacionalización del éxito de la GdP

El ítem 5 del éxito del modelo inicial, correspondiente a la segunda parte del cuestionario, se dejó como una variable que mide el éxito general, ya que mide la satisfacción del respondiente con el éxito del proyecto en general y amerita otro estudio.

4.2 Análisis clúster a las HBs

El análisis clúster consistió en un ejercicio exploratorio de agrupación de los datos obtenidos correspondientes a la parte del cuestionario que medía los comportamientos del director del proyecto, lado derecho del modelo.

En este análisis se buscó una homogeneidad de acuerdo con el intervalo de distancia euclídea mediante los métodos de agrupación: 1) entre grupos, 2) dentro de grupos, 3) vecino más lejano y 4) método de Ward.

La Figura 5 muestra la homogeneidad de la agrupación de los datos obtenidos por el método entre grupos. Los ítems agrupados mostraron una relación más coherente entre sí en comparación con las otras agrupaciones.

La agrupación entre grupos del análisis clúster generó un nuevo modelo de las habilidades blandas que requirió una nueva conceptualización y operacionalización, pues dio origen a las habilidades autogestión, estrategia y proactividad. La Tabla 5 presenta el modelo de las HBs resultante operacionalizado.

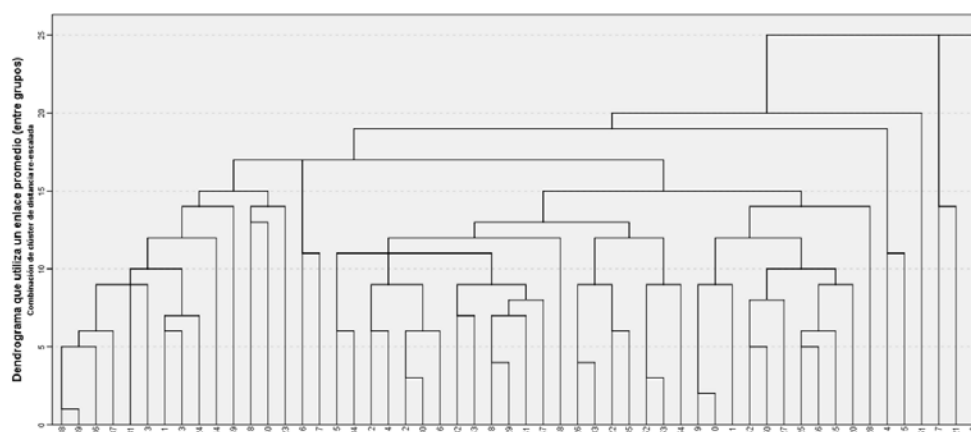


Figura 5. Dendrograma análisis clúster entre grupos

Tabla 5. Operacionalización de las HBs del modelo resultado del análisis clúster

Habilidad	ID	Ítem
Ética	P43	Tratar amablemente a los grupos de interés del proyecto (miembros del equipo, clientes, gerencia...).
	P44	Obrar reconociendo los derechos de los grupos de interés del proyecto (miembros del equipo, clientes, gerencia...).
	P41	Obrar con cautela ante situaciones que puedan generar perjuicio a los grupos de interés del proyecto (miembros del equipo, clientes, gerencia, entorno...).
	P42	Generar confianza entre los grupos de interés del proyecto (miembros del equipo, clientes, gerencia...).
Motivación	P6	Mantener el interés del equipo del proyecto para desarrollar las actividades del proyecto.
	P18	Mantener un ambiente de trabajo favorable para el logro de los objetivos del proyecto.
	P29	Interactuar de manera armoniosa con los miembros del equipo de trabajo.
Trabajo en equipo	P7	Demstrar interés en desarrollar las actividades del proyecto.
	P35	Cumplir con los compromisos asumidos en el desarrollo del proyecto.
Emprendimiento	P21	Cuidar al equipo del proyecto ante situaciones que pongan en riesgo el bienestar del mismo.
	P23	Mantener el empeño a pesar de las dificultades para el logro de los objetivos del proyecto.
	P34	Mantener una actitud positiva frente a las dificultades que se presenten en el proyecto.
	P46	Comprender la articulación entre las partes y el todo durante el ciclo de vida del proyecto.
Negociación	P52	Adaptarse a las circunstancias que demanda el entorno en que se desarrolla el proyecto.
	P31	Actuar con serenidad frente a imprevistos que pongan en riesgo el logro de los objetivos del proyecto.
	P38	Lograr que los grupos de interés (miembros del equipo, clientes, gerencia...) lleguen a acuerdos en situaciones de conflicto.
Comunicación	P27	Tolerar la existencia de diferentes posiciones entre los miembros del equipo de trabajo.
	P57	Comunicarse oralmente de manera efectiva (clara, coherente, precisa y oportuna) con los grupos de interés del proyecto (miembros del equipo, clientes, gerencia...).
	P58	Relacionarse con los grupos de interés del proyecto (miembros del equipo, clientes, gerencia...) abriendo espacios de cooperación para el beneficio mutuo.
Autogestión	P59	Comunicarse de manera asertiva (mesurada, oportuna, respetuosa y directa) con los grupos de interés del proyecto (miembros del equipo, clientes, gerencia...).
	P14	Establecer sus propias metas como director del proyecto.
	P15	Impulsar acciones para el logro de sus propias metas como director del proyecto.
Estrategia	P16	Evaluar el logro de sus propias metas como director del proyecto.
	P47	Generar iniciativas que lleven a soluciones originales ante las eventualidades del proyecto.
	P55	Hacer preguntas precisas que lleven a una comprensión oportuna de lo que sucede en el proyecto.
Proactividad	P32	Actuar oportunamente frente a imprevistos que pongan en riesgo el logro de los objetivos del proyecto.
	P30	Actuar anticipándose a las necesidades futuras del proyecto.
	P51	Actuar de manera rápida tomando en cuenta los cambios que surjan en el proyecto (internos o externos).
	P20	Dirigir las acciones del equipo de trabajo sin perder de vista los objetivos a largo plazo del proyecto.

La Tabla 6 presenta los resultados del análisis de la unidimensionalidad y fiabilidad del nuevo modelo. Estos resultados muestran que los ítems reagrupados entre grupos podían estar midiendo el nuevo constructo

con un buen coeficiente de fiabilidad. Solo la habilidad propuesta como proactividad tuvo ítems con Alpha de Cronbach por debajo de 0,7; sin embargo, se conservó porque el Alpha de habilidad como tal es de 0,808.

Tabla 6. Resultados unidimensionalidad y fiabilidad modelo HBs a partir del análisis clúster.

Dimensión	Ítem	Media	Desviación estándar	Cargas factor	Cronbach si se elimina	Alfa de cronbach	% varianza explicada	Ratio
Ética	P43	4,680	0,784	0,832	0,932	0,954	81,099	61,158
	P44	4,590	0,798	0,809	0,932			
	P41	4,430	0,835	0,878	0,944			
	P42	4,460	0,836	0,728	0,952			
Motivación	P6	4,459	0,767	0,891	0,872	0,910	84,805	209,530
	P18	4,459	0,803	0,685	0,866			
	P29	4,486	0,837	0,419	0,873			
Trabajo en equipo	P7	0,919	4,703	0,520	0,797	0,865	70,409	19,580
	P35	0,837	4,622	0,681	0,779			
	P21	0,652	4,541	0,650	0,853			
Emprendimiento	P23	4,514	0,607	0,868	0,840	0,886	68,778	18,307
	P34	4,514	0,651	0,682	0,855			
	P46	4,405	0,725	0,822	0,850			
	P52	4,432	0,689	0,735	0,871			
Negociación	P31	4,216	0,787	0,804	0,836	0,909	78,971	15,268
	P38	4,162	0,764	0,924	0,866			
	P27	4,324	0,709	0,640	0,900			
Comunicación	P57	4,514	0,731	0,876	0,854	0,905	85,250	27,826
	P58	4,486	0,731	0,827	0,844			
	P59	4,405	0,927	0,440	0,900			
Autogestión	P14	4,432	0,689	0,909	0,840	0,897	83,345	10,490
	P15	4,378	0,758	0,848	0,802			
	P16	4,189	0,776	0,389	0,915			
Estrategia	P47	4,324	0,626	0,924	0,795	0,845	77,021	16,180
	P55	4,459	0,605	0,710	0,743			
	P32	4,432	0,728	0,319	0,820			
Proactividad	P30	4,243	0,760	0,807	0,643	0,808	59,221	4,138
	P51	4,378	0,681	0,791	0,635			
	P20	4,568	0,603	0,853	0,875			

En la Figura 6 se presenta el modelo propuesto para el estudio de la relación de las HBs con el éxito de la GdP, luego del análisis clúster y de unidimensionalidad. Este modelo consta de 9 dimensiones con 29 ítems y el éxito de la GdP con 2 dimensiones y 5 ítems.

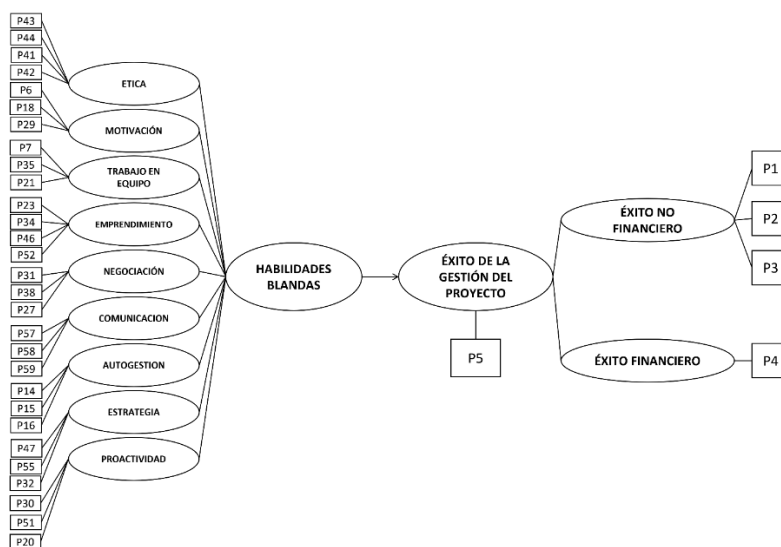


Figura 6. Modelo que relaciona las HBs con el éxito de la GdP

4.3 Relación de las HBs vs. éxito de la GdP

A partir del modelo presentado en la Figura 6 se definieron las hipótesis de relación de las HBs en general y de cada una de las habilidades con el éxito de la GdP, el éxito no financiero y el éxito financiero. Así, H1 es la hipótesis que las HBs inciden positivamente en el éxito de GdP, H2 es la hipótesis que las HBs inciden positivamente en el éxito no financiero del proyecto, H3 es la hipótesis que las HBs inciden en el éxito financiero del proyecto y así de H4 a H30 las hipótesis de relación entre cada habilidad con cada uno de los dos tipos de éxito definidos en el trabajo. La validación de las hipótesis se realizó a partir de un análisis de correlación entre variables, donde las hipótesis son aceptables cuando la significancia (Valor-p) es menor a 0.05. En las figuras que exponen las hipótesis de relación, se presentan en gris claro las hipótesis aceptables y en gris oscuro las rechazadas.

El presente modelo presenta evidencia de que se estableció una relación positiva entre las HBs del director de proyectos y el éxito de la GdP, como se muestra en la Figura 7. Este hecho pudo deberse a que las variables fueron dadas a partir de la relación de los datos obtenidos en campo, lo que podría considerarse resultado de la percepción de los participantes del estudio.

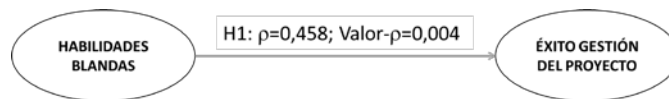


Figura 7. Correlación de las HBs del modelo con el éxito de la GdP.

No obstante, en la Figura 8 fue aceptable la hipótesis según la cual las HBs inciden positivamente en el éxito no financiero mientras que no hubo evidencia para la hipótesis de la relación con el éxito financiero.

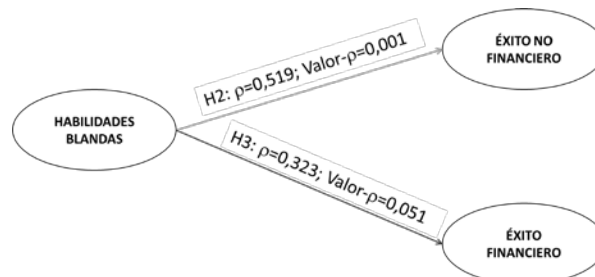


Figura 8. Relación de las HBs en general, con el éxito financiero y con el éxito no financiero

La Figura 9 presenta las hipótesis relacionadas con el éxito no financiero. Se encontró evidencia para aceptar las hipótesis de negociación (H8), autogestión (H10) y trabajo en equipo (H6), con significancias que no superan el valor de 0,01. Igualmente, se halló evidencias para las hipótesis de las habilidades comunicación (H9), emprendimiento (H7), proactividad (H12) y estrategia (H11).

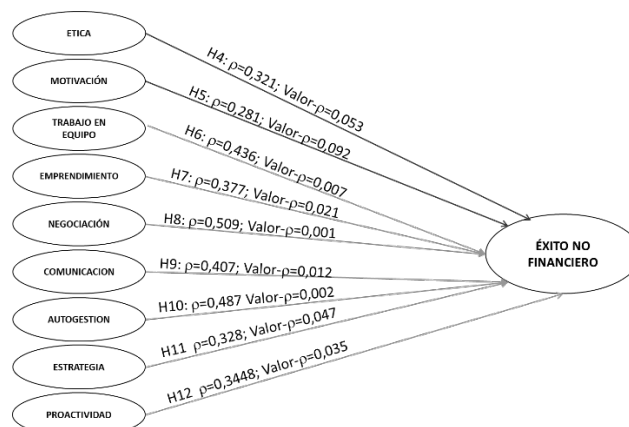


Figura 9. Relación de las HBs con el éxito no financiero

En lo referente a la incidencia de las habilidades en el éxito financiero, presentada en la Figura 10, solo se halló evidencias para la hipótesis H19, autogestión. Esta hace alusión a una habilidad que es particular del

individuo; es decir, es una habilidad que no necesariamente se pone en práctica al relacionarse con otros, sino que es más relacionada con la actitud o estilo de trabajo del director de proyectos.

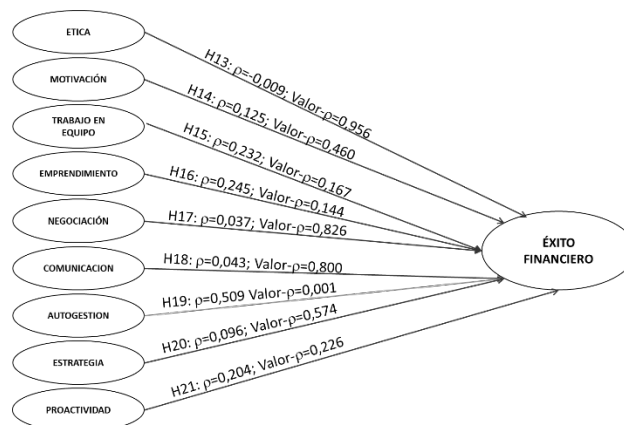


Figura 10. Relación de las HBs con el éxito financiero

Por último, en la Figura 11 que presenta la relación de las HBs con el éxito general del proyecto, se encontró evidencias para aceptar las hipótesis H28 (autogestión) y H30 (proactividad). Esta relación podría atribuirse a la consistencia que tuvo la habilidad autogestión (Alfa de Cronbach: 0,897).

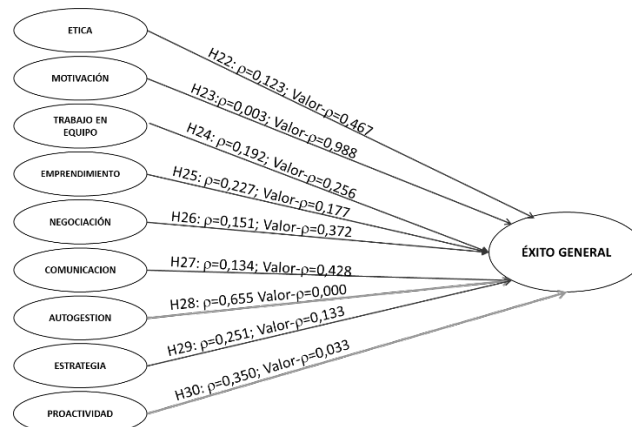


Figura 11. Relación de las HBs con el éxito general del proyecto

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las habilidades negociación y comunicación se destacaron como las HBs que más incidieron en el éxito no financiero del proyecto en el modelo. De esas dos habilidades, la comunicación ha sido foco de discusión en otros estudios; por lo que este estudio confirma la relevancia que tiene la comunicación en la ejecución de proyectos, teniendo en cuenta que ésta debe entenderse de diferentes maneras. Es decir, un director de proyectos debe tener buenas competencias en comunicación oral y escrita, escuchar activamente, entender y dar respuesta a interesados, mantener líneas de comunicación, asegurar la calidad de la información, adaptar estrategias de comunicación y manejar la comunicación multinivel para la gestión de los diferentes grupos de interés del proyecto [1, 38].

Adicionalmente, el director debe ser consciente de que la comunicación es una de las principales herramientas para negociar y resolver los conflictos que se puedan presentar con los interesados del proyecto. En este sentido, [39] sustentaron que el desarrollo de habilidades de comunicación encabeza la lista tanto para los gerentes de proyectos de nivel básico como para los gerentes de proyectos experimentados.

Se encuentra entonces coherencia en que en la consultoría ambiental la comunicación sea una habilidad relevante, si se tiene en cuenta que los grupos de trabajo suelen ser interdisciplinarios y se requiere que los profesionales de las diferentes ciencias que participan en ella se integren adecuadamente para lograr los objetivos del proyecto dentro de las restricciones de alcance, calidad y tiempo.

En cuanto a la incidencia de las HBs en el éxito general del proyecto se destacan las habilidades de autogestión y proactividad. Teniendo en cuenta los ítems que operacionalizan la proactividad en el modelo, éste apunta al trabajo en equipo como la habilidad que más influye en el éxito general del proyecto. Se acepta entonces que la habilidad del trabajo en equipo es la de mayor relevancia para el desarrollo exitoso de la gerencia de proyectos de consultoría ambiental, confirmando así que el director de proyectos exitoso es aquel que usa las HBs para liderar al equipo y dirigirlo a alcanzar el éxito del proyecto [13], a menudo teniendo como base la inteligencia emocional [40].

En este estudio, no se halló evidencia que permitiera relacionar el liderazgo con el éxito del proyecto. Se resalta este hallazgo debido a que en diferentes estudios el liderazgo aparece como una de las principales HBs a tener en cuenta en la GdP [41, 38]. No obstante, el liderazgo no es una habilidad que se descarte en el modelo; en primer lugar, porque este trabajo es exploratorio; segundo, porque son varios los estudios que proponen el incluir en los currículos de formación de profesionales en ingeniería o en dirección de proyectos el desarrollo de las HBs como liderazgo, comunicación, trabajo en equipo, negociación en conjunto con las competencias para la gerencia de proyectos [42, 43]. Asimismo, el liderazgo ha empezado a ser conceptualizado desde la perspectiva de la identidad y las historias personales de los directores de proyectos, y no solamente como un constructo derivado de atributos tales como comportamientos o competencias [25].

En el modelo propuesto se halló evidencia que permite aceptar la hipótesis que las HBs del director de proyectos influyen en el logro del alcance, calidad y tiempo, y que no inciden, al menos directamente, sobre el éxito financiero de los proyectos de consultoría ambiental. Desde la visión general del éxito del proyecto, el modelo mostró evidencia de que las HBs inciden en el éxito general del proyecto, lo cual se confirma, por ejemplo, desde la perspectiva con énfasis en el input-output [44].

Este trabajo se define como un estudio exploratorio realizado, en parte, como respuesta al desafío de realizar estudios sobre las competencias de los directores de proyectos en diferentes culturas y diferentes tipos de proyectos. Asimismo, deja planteado la operacionalización de las HBs del director del proyecto desde la misma contextualización del proyecto y con base en una conceptualización dada desde la teoría, teniendo en cuenta los factores culturales que vienen a incidir, en algunas ocasiones, sobre el concepto de uno u otro término.

En este estudio, las habilidades comunicación, negociación y trabajo en equipo se identifican como las HBs del director de proyectos que más inciden en el éxito del proyecto. Este resultado puede verse como una propuesta para identificar las competencias que deben entrar a desarrollarse en los profesionales que pueden optar por el área ambiental como campo de desempeño profesional.

El presente estudio, además de contribuir con la generación de conocimiento científico en el campo de la gerencia de proyectos y el desarrollo de la disciplina en Colombia, puede dar elementos para la gerencia de cambios curriculares que busquen incorporar el desarrollo de competencias blandas en los procesos de formación en la disciplina de la gerencia de proyectos; así como proveer bases para el análisis de las competencias a ser tenidas en cuenta en los procesos de selección de personal en la gerencia de proyectos.

Limitaciones del estudio

La forma en que fueron redactados los ítems del cuestionario aplicado en la fase de campo pudieron ser generadores de sesgo en las respuestas. Es decir, aunque el hecho que se redactaran en forma positiva pudo sesgar las respuestas de los encuestados [45], el haber combinado afirmaciones positivas y negativas podría haber tenido otro tipo de consecuencias como dificultades en la comprensión y más tiempo para responder el cuestionario [46].

El estudio estuvo limitado al sector de la consultoría ambiental realizada por grupos de investigación de la Universidad de Antioquia por lo cual la muestra obtenida para el análisis de datos fue pequeña lo que limitó el análisis estadístico. Los resultados de esta investigación requieren validaciones empíricas de mayor profundidad, como validez convergente y discriminante, además del estudio de las relaciones entre las HBs que permitan construir un modelo estructural entre ellas y comprender cuáles realmente impactan de

forma directa o indirecta el éxito de la GdP; por ejemplo, en el caso de megaproyectos [47, 48]. Asimismo, es importante determinar el papel de las competencias comportamentales [49] y la motivación en el desarrollo de las HBs del director de proyectos [50] y el posible impacto de estas variables en el éxito de la GdP.

Por último, este trabajo deja como reto, la realización de estudios de naturaleza confirmatoria que determinen cuáles competencias del director de proyecto son más relevantes para el éxito de un proyecto en el contexto colombiano, y que permitan la comparación con estudios de este tipo en otros países que lleven a generar nuevo conocimiento.

REFERENCIAS

- [1] PMI. (2013). Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos. Project Management Institute.
- [2] Pinto J. (2013). Lies, damned lies, and project plans: Recurring human errors that can ruin the project planning process. *Business Horizons* 56(5) 643–653.
- [3] Brokman M. et al. (2021). Perceived complexity of a project's optimal work plan influences its likelihood of adoption by project managers. *Project Management Journal* 52(5), 471–487.
- [4] Varajão J. et al. (2014). Critical success aspects in project management: Similarities and differences between the construction and the software industry. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette* 21(2), 583–589.
- [5] Drury M. (2014). Performance on agile teams: Relating iteration objectives and critical decisions to project management success factors. *Information and Software Technology* 56(5), 506–515.
- [6] Ljungblom M. y Lennerfors T. (2018). Virtues and vices in project management ethics: an empirical investigation of project managers and project management students. *Project Management Journal* 49(3), 5–16.
- [7] Rumeser D. y Emsley M. (2019). Can serious games improve project management decision making under complexity? *Project Management Journal* 50(1), 23–39.
- [8] Ika L. (2009). Project success as a topic in project management Journals. *Project Management Journal* 40(4), 6–19.
- [9] Pretorius S. et al. (2012). Project management maturity and project management success in the engineering and construction industries in Southern Africa. *South African Journal of Industrial Engineering* 23(3), 1–12.
- [10] Ahsan K. et al. (2013). Recruiting project managers: A comparative analysis of competencies and recruitment signals from job advertisements. *Project Management Journal* 44(5), 36–54.
- [11] Brière S. et al. (2015). Competencies of project managers in international NGOs: Perceptions of practitioners. *International Journal of Project Management* 33(1), 116–125.
- [12] Gillard S. (2009). Soft skills and technical expertise of effective project managers. *Issues in Informing Science & Information Technology* 6, 723–729.
- [13] Azim S. et al. (2010). The importance of soft skills in complex projects. *International Journal of Managing Projects in Business* 3(3), 387–401.
- [14] Creasy T. y Anantatmula V. (2013). From every direction - How personality traits and dimensions of project managers can conceptually affect project success. *Project Management Journal* 44(6), 36–51.
- [15] Giraldo G. et al. (2013). Project manager profile characterization in the construction sector in Bogotá, Colombia. *Project Management Journal* 44(6), 68–93.
- [16] Sukhoo A. et al. (2005). Accommodating soft skills in software project management. *Issues in Informing Science and Information Technology* 2, 691–703.
- [17] Takey S. y Carvalho M. (2015). Competency mapping in project management: An action research study in an engineering company. *International Journal of Project Management* 33(4), 784–796.
- [18] Langer N. et al. (2008). Project managers' skills and project success in it outsourcing. En ICIS 2008.
- [19] Fisher E. (2011). What practitioners consider to be the skills and behaviours of an effective people project manager. *International Journal of Project Management* 29(8), 994–1002.
- [20] Chipulu M. et al. (2013). A multidimensional analysis of project manager competences. *IEEE Transactions on Engineering Management* 60(3), 506–517.
- [21] Pinkowska M. y Lent B. (2011). Evaluation of Scientific and Practice Approaches to Soft Skills Requirements in the ICT Project Management. *IBIMA Business Review Journal* 2011, 1–12.
- [22] Mejía R. et al. (2013). Product lifecycle management (PLM) as a strategy for project structuring and coordination. En 17th International Congress on Project Management and Engineering. Logroño, España.
- [23] Guevara M. et al. (2011). Promoting good design management practices in Colombian construction projects. En 27th Annual Conference ARCOM. Bristol, UK.
- [24] Díaz F. et al. (2014). ICT as a means of generating knowledge for project management. En 8th International Conference on Knowledge Management in Organizations. Netherlands.
- [25] Sergeeva N. y Kortantamer D. (2021). Enriching the concept of authentic leadership in projectbased organisations through the lens of life-stories and self-identities. *International Journal of Project Management* 39(7), 815–825.

- [26] Müller R. y Turner R. (2007). The Influence of project managers on project success criteria and project success by type of project. *European Management Journal* 25(4), 298-309.
- [27] Badewi A. (2021). When frameworks empower their agents: The effect of organizational project management frameworks on the performance of project managers and benefits managers in delivering transformation projects successfully. *International Journal of Project Management* 40(2), 132-141.
- [28] Lavagnon A. (2009). Project success as a topic in project management journals. *Project Management Journal* 40(4), 6-19.
- [29] Shenhar A. y Dvir D. (2008). Project management research - The challenge and opportunity. *IEEE Engineering Management Review* 36(2), 112-121.
- [30] Kubr, M. (2010). *La consultoría de empresas: Guía para la profesión*. Limusa.
- [31] OECD. (1999). *The environmental goods and services industry: Manual for data collection and analysis*. OECD.
- [32] Bouteligier S. (2010). Conceptualizing global environmental consultancy firms as actors in global environmental governance. *Institute for International and European Policy* 36, (1-30).
- [33] Hernández et al. (2014). *Metodología de la Investigación* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- [34] Skulmoski G. y Hartman F. (2010). Information systems project manager soft competencies: A project-phase investigation. *Project Management Journal* 41(1), 61-80.
- [35] Pérez J. (2016). *Tópicos avanzados en la elaboración del artículo de investigación científica: Materiales y métodos*. Universidad de Antioquia.
- [36] León A. (2006). La unidimensionalidad de un instrumento de medición: perspectiva factorial. *Revista de Psicología de la PUCP* 24(1), 53-80.
- [37] Welch S. y Comer J. (1988). *Quantitative Methods for Public Administration: Techniques And Applications*. Waveland Press.
- [38] Stevenson D. y Starkweather J. (2010). PM critical competency index: IT execs prefer soft skills. *International Journal of Project Management* 28(7), 663-671.
- [39] Slattery D. y Sumner M. (2011). Leadership Characteristics of Rising Stars in Construction Project Management. *International Journal of Construction Education and Research* 7(3), 159-174.
- [40] Zhu F. et al. (2021). Project manager's emotional intelligence and project performance: The mediating role of project commitment. *International Journal of Project Management* 39(7), 788-798.
- [41] Fletcher S. et al. (2014). Soft skills of senior contracts managers in Northern Ireland. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law* 167(1), 35-45.
- [42] Sumner M. y Powell A. (2013). What project management competencies are important to job success? En 19th Americas Conference on Information Systems. Chicago, United States.
- [43] Wikle T. y Fagin T. (2015). Hard and soft skills in preparing GIS professionals: Comparing perceptions of employers and educators. *Transactions in GIS* 19(5), 641-652.
- [44] Li Y. et al. (2020). What makes a competent international project manager in emerging and developing countries? *Project Management Journal* 51(2), 181-198.
- [45] Churchill G. (1979). A paradigm for developing better measures of marketing constructs. *Journal of Marketing Research* 16(1), 64-73.
- [46] Abdullah F. (2006). The development of HEdPERF: a new measuring instrument of service quality for the higher education sector. *International Journal of Consumer Studies* 30, 569-581.
- [47] Denicol J. et al. (2020). What are the causes and cures of poor megaproject performance? a systematic literature review and research agenda. *Project Management Journal* 51(3), 328-345.
- [48] Zheng X. et al. (2021). Unveiling complex relational behavior in megaprojects: A qualitative-quantitative network approach. *International Journal of Project Management* 39(7), 738-749.
- [49] Gruden N. y Stare A. (2018). The influence of behavioral competencies on project performance. *Project Management Journal* 49(3), 98-109.
- [50] Havermans L. et al. (2019). Rolling into the profession: exploring the motivation and experience of becoming a project manager. *Project Management Journal* 50(3), 1-15.

Diseño de un proceso para la implementación de las 5S en una empresa prestadora de servicios a pequeña escala

Paula Alejandra Peña Molina¹

Luz Marina Herrera León²

Mary Luz Ordoñez Santos³

Universidad de Pamplona

Colombia

El propósito de este capítulo es presentar los hallazgos de un estudio dedicado a diseñar un proceso para la implementación de las 5S en una empresa prestadora de servicios a pequeña escala. Se enfoca en la aplicación de las 5S como método de trabajo aplicado en la empresa Incolplas S.A.S., Colombia, con la finalidad de optimizar la utilización de los espacios, capacitar a los colaboradores y mejorar las condiciones de las áreas de trabajo. Se desarrolló un clima agradable de trabajo basado en las 5S: clasificación, orden, limpieza, estandarización y disciplina; un uso racional de los recursos y disminución de sobrecostos y reprocesos. Se concluye que la aplicación de las 5S es importante en los procesos, sin embargo, demanda alto compromiso de la dirección y los colaboradores de la empresa.

¹ Ingeniera Industrial.

Contacto: paula.penapa@unipamplona.edu.co

² Especialista en Estadística Aplicada, Especialista en Computación, Magíster en Estadística y Doctora en Educación.

Contacto: lmherrera@unipamplona.edu.co

³ Doctora en Administración.

Contacto: maryluz@unipamplona.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El dinamismo y la tecnología son esenciales en una organización exitosa para ser competitiva en sus productos y servicios. En primer lugar, el dinamismo se logra mediante la mejora de sus prácticas, atendiendo los desafíos con decisiones que toman los gerentes en el entorno competitivo, lo cual le asegura logros y aprovechamiento de oportunidades. En segundo lugar, la tecnología se asocia a cambios donde tener experiencia y conocimiento es necesario para mejorar, pero también es esencial evaluar el desempeño para lograr una calidad reconocida [1].

El concepto de las 5S fue desarrollado inicialmente por Hiroyuki Hirano para un sistema de producción. Está clasificado como una herramienta Lean Manufacturing en la gestión de procesos, que da un valor añadido a las industrias manufactureras, logrando la estandarización adecuada de los procesos y métodos.

Los sistemas de manufactura esbelta dependen de los principios de 5S, en los cuales se valora, la clasificación, organización, limpieza y otros requisitos básicos que mejoran el ambiente laboral, facilitando aspectos tales como, el manejo de materiales, organización de herramientas, operaciones, diseño y las denominadas metodologías de limpieza, que en gran medida optimizan la eficiencia, eficacia y consecuentemente, la productividad [2].

Se han desarrollado modelos de ecuaciones estructurales basados en el método de mínimos cuadrados para encontrar y analizar la implicación del sistema Lean Manufacturing 5S, lográndose mejorar la calidad del servicio y sostenibilidad. Los constructos analizados en investigación son, la calidad del servicio, el desperdicio del servicio y la organización del lugar de trabajo. El sistema 5S se identificó como un refuerzo en mejora de la calidad del servicio en la franquicia de supermercados en Bandung, Indonesia [3].

La idea general de las 5S es que representan, la organización con todo lo que se posee en un espacio determinado, removiendo lo innecesario, estableciendo las tareas de forma lógica, ejecutando tareas de limpieza y manteniendo el ciclo andando. La *S*, son las iniciales de las 5 palabras japonesas que especifican las fases que componen el método [4]:

- SEIRE (Clasificación): es el término básico para el estándar, que sigue el principio: *just what is needed*, donde las cantidades son solo las necesarias y solo cuando se necesitan. Esto se refiere a la eliminación de elementos innecesarios de la organización para realizar la tarea.
- SEITON (Orden): el término se refiere a la puesta en orden, al principio: *"Un lugar para todo y todo en su lugar"*. Este principio ayuda a mantener todos los equipos en orden y etiquetados para ser utilizados en el momento requerido.
- SEISO (Limpieza): el término abarca toda la organización, lo que incluye limpieza, barrido y eliminación de polvo/suciedad/residuos. Se debe hacer a diario para tener un ambiente saludable.
- SEIKETSU (Estandarizar): el término se refiere a establecer estándares de las mejores prácticas en la organización, también, reseña la necesidad de llevar registros para asegurar las 5S, como parte de la cultura de la organización.
- SHITSUKE (Disciplina): el término se refiere al proceso de formar un hábito de mejora continua. Es esencial implementar las otras 4S, y el compromiso de la alta dirección para que sea sostenible en el tiempo, donde la dirección apoyará con capacitaciones a los colaboradores y la ubicación de los tableros en áreas prominentes mantendrán la actualización de los procesos y métodos.

El propósito de la investigación es proponer una mejora para Incolplas S.A.S en los procesos de abastecimiento y documentación, mediante las 5S; lo que se logra haciendo un análisis total de la empresa a partir de su situación actual, aplicando las herramientas, generando tiempos y recursos, antes y después de la operación, y así, se obtiene como resultado una mejora notable en cuanto a la reducción de tiempos y costos para la ejecución de cada proceso, ayudando en su mejora continua, sin embargo, se recomienda a la empresa mantener las capacitaciones y visitas periódicas para continuar el plan y no

bajar la guardia, generando hábito en los colaboradores dentro del proceso de la cadena de suministro, acorde a las necesidades de la organización y sus clientes.

La empresa Incolplas S.A.S. buscó evolucionar hacia una empresa con procesos estandarizados, documentados y sistematizados, donde cada proceso de la cadena de suministro este acorde con las necesidades de sus clientes y el entorno global, por este motivo, como se anotó anteriormente, fue importante considerar el impacto que podrían estar causando las posibles fallas existentes a lo largo de todo el proceso, donde, no solo se podía afectar a la empresa focal, sino también, sus lazos previos, o proveedores o sus lazos posteriores, o clientes.

El diagnóstico indicó que existía personal no capacitado para algunos procedimientos y las tareas no estaban clasificadas, lo que ocasionaba demora en entregas de pedidos, o falta de insumos, además de desorden, por esto, la aplicación de las 5S de Lean Manufacturing y el método Kanban permitió identificar y solucionar las causas.

2. MÉTODO

El método se determinó por la aplicación de medidas de tiempos y movimientos, de un antes y un después, con la selección de una mejora en el almacén de Incolplast S.A.S, en la operación de pedidos, donde se encontraron movimientos ineficientes y reprocesos por falta de organización, lo que ocasionaba aumento en el tiempo de entrega de pedidos y costos de operación.

En el antes del proceso de pedidos, se utilizó el estudio de tiempos, la medición se obtuvo con una duración de 5 semanas y las actividades que se midieron fueron:

1. Solicitud del pedido por parte del cliente
2. Aprobación por parte del ingeniero de operaciones
3. Consolidación de la compra y envío al proveedor
4. Espera de respuesta del proveedor
5. Consolidación de la respuesta del proveedor
6. Espera de mercancía
7. Ingreso de mercancía al sistema
8. Reingreso de mercancía por pedido incompleto por parte del proveedor
9. Viajes de entrega de insumos a clientes

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Durante este proceso de medición de tiempos se detectaron esperas en transportes y almacenamientos temporales, que se midieron durante el estudio:

- Espera mientras al proveedor le llegaba materia prima
- Espera mientras el proveedor entregaba el pedido completo
- Desplazamiento personal del encargado de compras al centro de la ciudad a buscar el insumo
- Almacenamiento
- Desplazamiento para traer facturas
- Desplazamiento a buscar carpeta de orden de compra
- Desplazamiento a buscar minuta
- Desplazamiento a llevar facturas para legalizar
- Espera a que el gerente revise las órdenes de compra y orden de envío

Las herramientas utilizadas fueron el cronometro y un formato que se presentan en la Tabla 1. El tiempo del ciclo fue de 15 días, en promedio para las compras. Una vez finaliza el ciclo de la primera quincena, comienza uno nuevo. Se encontró un promedio de 36 viajes realizados por conductor dentro del ciclo, contando con los reprocesos de insumos que no se enviaron en un inicio por diferentes motivos. Además, se encontró que, con todos los conductores de la empresa, el gasto representa COP \$5.670.000, correspondiente a un gasto promedio de \$70.000 por camión, cuando sale de la empresa.

Tabla 1. Tiempo y movimientos del pedido antes aplicar la 5S

Operación	Tiempo promedio	Movimientos
1 Solicitud del pedido por parte del cliente	3 días	1
2 Aprobación por parte del ingeniero de operaciones	2 días	2
3 Consolidar la compra y enviar a proveedor	0,5 día	2
4 Esperar respuesta del proveedor	2 días	1
5 Consolidar respuesta del proveedor	1,5 día	2
6 Espera de mercancía	4 días	2
7 Ingreso de mercancía al sistema	1,5 día	3
8 Reingreso de mercancía por pedido incompleto por parte del proveedor	0,5 día	3
9 Viajes de entrega de insumos a clientes.	9 días	81

3.1 Etapa 1 – SEIRE- Clasificar

Fue necesario capacitar al personal para que los colaboradores desarrollaran un rol específico en la empresa. En el análisis se notó alto reproceso innecesario, por falta de conocimientos y capacitaciones, lo que sumaba tiempo al proceso final. Un proceso innecesario encontrado, fue la verificación de documentos, pues, el personal encargado de compras realizaba el documento, luego, debía llevarlo a la oficina del jefe para que lo revisara y además, validará que todo estaba en orden y posteriormente, devolverlo al encargado para que hiciese el envío del mismo al destino pertinente, para así, poder ejecutar la orden de compra, esto quiere decir, que se hace uso de tiempos y movimientos ociosos que retrasan los procesos y en algunas ocasiones, se encontró que el jefe no estaba, o estaba ocupado, lo que retrasaba, aún más el proceso.

Esto no solo pasaba en el proceso de compras, sino, en el almacén, en cuanto a los pedidos recibidos y despachos a clientes, por esto, fue necesario implementar las capacitaciones acerca de los temas de elaboración de documentos con el fin de dar claridad a los colaboradores y que, ellos mismos realizaran la verificación con plena seguridad del tema. Los resultados para la auditoria de las actividades establecidas para esta etapa se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Formato de auditoria SEIRE (Clasificar)

Área: _____	Fecha	Elaborado	Revisado	Aprobado
Almacén: _____	23/03/2022	Asesor externo	Jefe de Logística	Gerente general
Fecha: _____	Leyenda			
Auditor: _____	0 a ≤ 3	No cumple		
Investigador: _____	4 ≤ 7	Cumple, pero con observaciones		
	8 a ≤ 10	Cumple		
Cat	Asunto	Antes	Actual	Observaciones
	¿A la vista se cuenta con los implementos necesarios para trabajar?	5	10	Son los equipos listos para ser despachos
	¿Los objetos de trabajo están ubicados en orden?	0	7	Faltan algunos por posicionar según su requerimiento
	¿El área de trabajo está despejada y sin estorbos?	5	9	No hay obstáculos de material de desecho.
Seire Clasificar	¿Los materiales están clasificados y en el sitio para su fin?	0	7	Falta una mínima parte por clasificar.
	¿Existen a la vista objetos innecesarios en el área?	0	5	Aún se encuentran algunos innecesarios.
	¿Los pasillos están libres de objetos?	0	10	Se encuentran despejados
	¿Existe un lugar específico para el material de desecho?	5	10	Si existe en todos los sitios
	Total	15	55	Base: 70
Resultado de conclusión		Antes 21% y Actual 79%, se muestra que el SEIRE obtuvo una mejora de 58% en la auditoria.		

Para probar estadísticamente la diferencia entre el antes y el después, se hace en el SPSS 25, la prueba t-Student de muestras relacionadas, cuyos resultados, se presentan en la Tabla 3, donde se aprecia un P-valor = 0,000 ≤ 0,05 probándose que existe una diferencia significativa, entre el antes y el después de la implementación de las 5S para SEIRE.

Tabla 3. Resultado de la Prueba t-Student para SEIRE en el SPSS 25

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	Seire_antes - Seire_después	-6,143	2,035	,769	-8,025	-4,260	-7,985	6	0,000

3.2 Etapa 2 – SEITON (Ordenar)

En esta etapa, fue necesaria la reubicación de puestos de oficina. Logrando disminuir tiempos y movimientos, se realizaron cambios en la ubicación de las herramientas de trabajo, ya que los traslados, que, debía realizar el operario en la ejecución de las diferentes tareas afectaban el desempeño, lográndose con ello, disminuir el tiempo en ejecución de esta misma tarea, es decir realizarla en menos tiempo, lo que optimizó el resultado final. Además, se eliminaron objetos inoficiosos dentro del área. Los resultados para la auditoría de SEITON se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Formato de auditoría SEITON (Ordenar)

Área: _____	Fecha	Elaborado	Revisado	Aprobado
Almacén: _____	23/03/2022	Asesor externo	Jefe de Logística	Gerente general
Fecha: _____	Leyenda			
Auditor: _____	0 a ≤ 3	No cumple		
Investigador: _____	4 ≤ 7	Cumple, pero con observaciones		
	8 a ≤ 10	Cumple		

Cat	Asunto	Antes	Actual	Observaciones
Seiton Ordenar	¿Se observan todas las áreas identificadas?	5	10	Identifican los almacenes con carteles.
	¿Los objetos están posicionados en su sitio?	0	10	Todos los equipos ubicados en su sitio
	¿Es fácil visualizar dónde se encuentra cada objeto?	3	8	Persisten algunos objetos
	¿Tener objetos ubicado en su sitio reduce el tiempo en desplazamientos?	0	8	Manipular los materiales toma menos tiempo
	¿Existe la zona de material rechazado?	4	10	Existe ubicación de material rechazado y es utilizado para su fin
	¿Existen lugares señalados para todo material que llega o sale del almacén?	5	10	Señales para los puntos de ingreso y salida del material
	¿Existe correcta señalización en los pasillos?	5	10	Todos los pasillos permiten el libre tránsito
Total		22	66	Base: 70

Resultado de conclusión	Antes 31% y Actual 94%, se muestra que el Seiton obtuvo una mejora de 63% en la auditoría.
-------------------------	--

Para probar estadísticamente la diferencia, se hace en el SPSS 25 la prueba t-Student de muestras relacionadas, cuyos resultados se presentan a en la Tabla 5, donde se aprecia un P-valor = $0,000 \leq 0,05$, probándose que existe una diferencia significativa entre el antes y el después de la implementación de las 5S para SEITON

Tabla 5. Resultado de la Prueba t-Student para SEITON en el SPSS 25

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	Seiton_antes - Seiton_después	-6,286	1,976	,747	-8,113	-4,458	-8,416	6	0,000

3.3 Etapa 3 – SEISO (Limpiar)

Se generó conciencia por un ambiente sólido de trabajo por medio de charlas pedagógicas. Las charlas en esta actividad no fueron muy extensas, por el contrario, cortas, pero productivas, se realizaron

semanalmente, donde se irradió la necesidad y la disciplina por mantener un ambiente ameno ante cualquier situación de la empresa, para con todos los que trabajan allí, se fomentó la limpieza, en todo sentido, tanto en agentes de suciedad y mugre, como en agentes físicos y personales.

Los resultados de la auditoria SEISO se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Formato de auditoria SEISO (Limpieza)

Área: _____	Fecha	Elaborado	Revisado	Aprobado
Almacén: _____	23/03/2022	Asesor externo	Jefe de Logística	Gerente general
Fecha: _____	Leyenda			
Auditor: _____	0 a ≤ 3	No cumple		
Investigador: _____	4 ≤ 7	Cumple, pero con observaciones		
	8 a ≤ 10	Cumple		

Cat	Asunto	Antes	Actual	Observaciones
Seiso Limpieza	¿Se observa aseo en los pasillos?	5	10	Los pasillos están limpios
	¿Se observa aseo en el lugar de trabajo?	5	10	Los lugares de trabajo están aseados
	¿Se observan materiales en el suelo?	0	7	Persisten algunos materiales en el suelo
	¿Las paredes se encuentran pintadas y limpias?	5	7	Existen algunas áreas que no cumplen, ni se identifican correctamente
	¿El <i>lay out</i> del área está claramente definido?	0	10	Se tiene un nuevo <i>lay out</i>
	¿Existe un programa de limpieza?	0	10	Se tiene un programa de limpieza y se cumple con el.
	Total	15	54	Base: 60

Resultado de conclusión: Antes 25% y Actual 90%, se muestra que el Seiso obtuvo una mejora de 65% en la auditoria.

También, para probar estadísticamente la diferencia, se hace en el SPSS 25, la prueba t-Student de muestras relacionadas, cuyos resultados se presentan en la Tabla 7, donde se aprecia un P-valor = 0,004 ≤ 0,05, probándose que existe una diferencia significativa entre el antes y el después de la implementación de las 5S para SEISO.

Tabla 7. Resultado de la Prueba t-Student para SEISO en el SPSS 25

Prueba de muestras emparejadas		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	Seiso_antes - Seiso_después	-6,500	3,146	1,285	-9,802	-3,198	-5,060	5	0,004

3.4 Etapa 4 – Seiketsu (Estandarizar)

Fue necesario adaptar archivos o documentación al proceso. Cuando se realizó el análisis, se observó que existían procesos que no se realizaban, como tal, entonces, para ello, se diseñó un pequeño formato tipo *chek-list* donde se establece un procedimiento con su revisión periódica, de tal manera, que se mantuviera el orden de los procesos, se implementó, facilitando la identificación de las causas, de posibles de los problemas y conservar, lo que se logró en las fases anteriores, para ello, fue necesario crear la normativa de mantener el área en condiciones óptimas de funcionamiento.

El resultado de la auditoria Seiketsu se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Formato de auditoria SEIKETSU (Estandarizar)

Área: _____	Fecha	Elaborado	Revisado	Aprobado
Almacén: _____	23/03/2022	Asesor externo	Jefe de Logística	Gerente general
Fecha: _____	Leyenda			
Auditor: _____	0 a ≤ 3	No cumple		
Investigador: _____	4 ≤ 7	Cumple, pero con observaciones		
	8 a ≤ 10	Cumple		

Cat	Asunto	Antes	Actual	Observaciones
Seiketsu Estandarizar	¿Se evidencian indicadores de gestión (productividad, seguridad) en el área?	0	8	Se lleva seguimiento de los indicadores de gestión necesarios
	¿Se llevan listas de verificación?	5	10	Se utilizan las listas de verificación
	¿Se observan las normas de seguridad para los distintos materiales?	5	10	Todos los materiales están señalados adecuadamente
	¿Los empleados usan un método estándar para desarrollar su trabajo?	3	10	Se estandarizaron los procedimientos
	¿Los estándares de colores están bien identificados y son conocidos?	0	7	Algunos faltan por señalar
	Total	13	45	Base: 50
Resultado de conclusión		Antes 26% y Actual 90%, se muestra que el Seikets obtuvo una mejora de 64% en la auditoria.		

Para probar estadísticamente la diferencia, se hace en el SPSS 25 la prueba t-Student de muestras relacionadas, cuyos resultados se presentan a en la Tabla 9, donde se aprecia un P-valor = 0,000 ≤ 0,05, probándose que existe una diferencia significativa, entre el antes y el después de la implementación de las 5S para Seiketsu.

Tabla 9. Resultado de la Prueba t-Student para SEIKETSU en el SPSS 25

Prueba de muestras emparejadas		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
Par	Seiketsu_antes - Seiketsu_después	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	Seiketsu_antes - Seiketsu_después	-6,400	1,342	,600	-8,066	-4,734	-10,667	4	0,000

3.5 Etapa 5 – Shitsuke (Mantener)

Se nombró un comité de calidad encargado periódicamente de supervisar todo lo establecido a fin de mantener los cambios. En esta etapa, se motivó la implementación en el personal de la autodisciplina, como dice, Masaaki Imai *"las personas que continuamente practican seiri, seiton, seiso y seiketsu, son personas que han adquirido el hábito de hacer de estas actividades parte su trabajo diario -adquieren autodisciplina"* [5]. Por ello, fomentar en los colaboradores la cultura de trabajo, donde todos participen activamente, va más allá de acciones momentáneas, o de incorporar normas establecidas, se trata de convertirlo en una conducta habitual. Al mismo tiempo, convertir en hábito el empleo y la utilización de los métodos establecidos. Para ello, se necesita ayuda, por lo que se le encarga a una persona de hacer las revisiones periódicas, donde va a examinar por medio de los formatos ya creados, que todo fluya, como se estableció. El resultado de la auditoria Shitsuke se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Formato de auditoria SHITSUKE (Disciplina)

Área: _____	Fecha	Elaborado	Revisado	Aprobado
Almacén: _____	23/03/2022	Asesor externo	Jefe de Logística	Gerente general
Fecha: _____	0 a ≤ 3	No cumple		
Auditor: _____	4 ≤ 7	Cumple, pero con observaciones		
Investigador: _____	8 a ≤ 10	Cumple		
Cat	Asunto	Antes	Actual	Observaciones
Shitsuke Disciplina	¿En las reuniones de equipo se discute el resultado de las evaluaciones?	0	10	Cada equipo analiza los resultados de la evaluación y hacen solicitudes a la gerencia.
	¿El indicador de las 5S muestra una tendencia positiva?	5	10	En general la tendencia es ser mejor en todas las evaluaciones
	¿Se lleva evidencia fotográfica de las áreas?	5	10	Se inició a tener evidencia fotográfica y se lleva un historial
	¿En el área todos conocen las 5S y las practican cotidianamente?	3	10	Existe la cultura 5S
	¿Se mantienen actualizados los indicadores de gestión?	0	7	Se presentan los indicadores, pero hace falta más seguimiento

¿El encargado del área fomenta el compromiso?	0	10	Existe compromiso de la alta gerencia con los equipos de las áreas
Total	13	57	Base: 60
Resultado de conclusión	En base a la referencia del: Antes 22% y Actual 95%, se muestra que el Shitsuke obtuvo una mejora de 73% en la auditoria.		

Por último, para probar estadísticamente la diferencia se hace en el SPSS 25 la prueba t-Student de muestras relacionadas cuyos resultados, se presentan a en la Tabla 11, donde se aprecia un P-valor de 0,004 probándose que existe una diferencia significativa entre el antes y el después de la implementación de las 5S.

Tabla 11. Resultado de la Prueba t para SEIKETSU en el SPSS 25

Prueba de muestras emparejadas		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia					
				Inferior	Superior				
Par 1	Shitsuke_antes - Shitsuke_después	-7,333	2,251	,919	-9,696	-4,971	-7,980	5	0,000

En este orden de ideas, en el comparativo de las auditorias, las cuales se basaron en el porcentaje de cumplimiento al inicio y al final de cada implementación, según sea la S, se encontraron los siguientes datos para antes de la implementación: 21% Seire; 31% Seiton; 25% Seiso; 26% Seiketsu y 22% Shitsuke; y para después de la implementación, los datos fueron: 79% Seire; 94% Seiton; 90% Seiso; 90% Seiketsu y 95% Shitsuke.

Este ejercicio facilitó la apreciación general con respecto a cada "S" en el momento de la aplicación de la auditoria y permitió asegurar que existió una mejora significativa en los procesos de la empresa Incolplas S.A.S.

Se logró un nuevo proceso de pedidos, aplicado todo lo dicho anteriormente y tomando los tiempos y movimientos después de la implementación de las 5S, se encontró, un cambio muy efectivo para la empresa; en la Tabla 12, se observan los resultados en cuanto optimización, lo que impacta en el ahorro de dinero en transporte, mejoras en el ambiente laboral y procesos más exitosos.

Tabla 12. Tiempo del pedido después de aplicar la 5S

Operación	Tiempo promedio	Movimientos
1 Solicitud del pedido por parte del cliente	3 días	1
2 Aprobación por parte del ingeniero de operaciones	1 día	1
3 Consolidar la compra y enviar a proveedor	0,5 día	2
4 Esperar respuesta del proveedor	0,5 día	1
5 Consolidar respuesta del proveedor	0,5 día	1
6 Espera de mercancía	2 días	3
7 Ingreso de mercancía al sistema	1 día	3
8 Reingreso de mercancía por pedido incompleto por parte del proveedor	0 día	0
9 Viajes de entrega de insumos a clientes.	5 días	60

Aplicadas las mejoras en los procesos de pedidos, se ve un cambio significativo en la operación de compra, lo cual, fue muy satisfactorio para la empresa, ya que mejoró en un 26% los costos de ruta, y así mismo, disminuyeron los tiempos y movimientos de la operación. Igualmente, para determinar la diferencia significativa en tiempos y movimientos, se realizó una prueba t-Student para muestras relacionadas, en la Tabla 13, se presentan los resultados de los tiempos tomados antes y después de la implementación de 5S.

En la tabla 14, se muestran los resultados en los cuales se aprecia un P-valor=0,023≤0,05, probándose que existe una diferencia significativa en los tiempos, entre el antes y el después de la implementación 5S en el proceso de pedidos de la empresa Incomplas S.A.S.

Tabla 13. Tiempos antes y después de la implementación de 5S

Operación	Antes 5S	Después 5S
1 Solicitud del pedido por parte del cliente	3 días	3 días
2 Aprobación por parte del ingeniero de operaciones	2 día	1 día
3 Consolidar la compra y enviar a proveedor	0,5 día	0,5 día
4 Esperar respuesta del proveedor	2 día	0,5 día
5 Consolidar respuesta del proveedor	1,5 día	0,5 día
6 Espera de mercancía	4 días	2 días
7 Ingreso mercancía al sistema	1,5 día	1 día
8 Reingreso de mercancía por pedido incompleto por parte del proveedor	0,5 día	0 día
9 Viajes de entrega de insumos a clientes.	9 días	5 días

Tabla 14. Resultado de la Prueba t-Student de medición de tiempos antes y después de la implantación de las 5S en el SPSS 25

Prueba de muestras emparejadas		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	Tiempo antes - tiempo después	1,16667	1,2500	0,41667	0,20583	2,12750	2,800	8	0,023

Los datos tomados en el número de movimientos se muestran en la Tabla 15 para los movimientos antes y después de la implementación 5S en el proceso de pedidos.

Tabla 15. Número de movimientos antes y después de la implementación 5S

Operación	Antes 5S	Después 5S
1 Solicitud del pedido por parte del cliente	1	1
2 Aprobación por parte del ingeniero de operaciones	2	1
3 Consolidar la compra y enviar a proveedor	2	2
4 Esperar respuesta del proveedor	1	1
5 Consolidar respuesta del proveedor	2	1
6 Espera de mercancía	2	3
7 Ingreso mercancía al sistema	3	3
8 Reingreso de mercancía por pedido incompleto por parte del proveedor	3	0
9 Viajes de entrega de insumos a clientes.	81	60

Igualmente, se realizó para los movimientos una prueba t Student para muestras relacionadas, en la Tabla 16 se observa un P-valor =0,263 \geq 0,05, probándose que no existe una diferencia significativa entre los movimientos antes y después de la implementación de las 5S.

Tabla 16. Resultado de la Prueba t-Student de medición para movimientos en el SPSS 25

Prueba de muestras emparejadas		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	Tiempo antes - tiempo después	2,7777	6,92419	2,3080	-2,54463	8,10018	1,204	4	0,263

4. CONCLUSIONES

El proceso de observación permitió identificar inicialmente, varias inconsistencias en la empresa, la que más se resaltó fue la operación de compras; se dedujo que, si se mejoraba esta área por resultado, se iban a mejorar las demás; al realizar el análisis de la situación actual, durante las primeras cuatro semanas, se trabajó con las 5S, lográndose la mejora al dar a cada área las herramientas Lean Manufacturing 5S, para utilizarlas e implementarlas, durante los cuatros meses de durabilidad del proyecto; la evidencia muestra que hasta el momento, todo fluye muy bien, a fin de continuar, se estableció una revista periódica para llevar constancia de lo aplicado y crear disciplina frente a lo

realizado, además, se resalta que las capacitaciones fueron puntuales de temas explícitos que se necesitaban para reducir los movimientos y tiempos ociosos

Se puede mencionar que algunas mejoras son: reducción en el tiempo del ciclo de compras, además, se redujeron los viajes de entrega de insumos a clientes, también, se redujeron los movimientos a la hora de la operación, así mismo, se redujo el número de las actividades de reproceso, se mejoró el ambiente de trabajo y se disminuyeron en un 26% los costos de ruta

También, se resalta que el tiempo en realizar la operación de compras, paso de ser 15 días a 10 días, los viajes de entrega de insumos disminuyeron, ya que, al momento de realizar la compra, se cuenta, no solo con un proveedor, sino, con varias opciones, por ende, el total de la mercancía solicitada está a tiempo para su envío y no hay necesidad de realizar un reproceso; además, con las capacitaciones prestadas a los empleados/colaboradores, ya no es necesario realizar ciertos movimientos, que a la hora de la operación, sumaban tiempo para lograr su fin, así, se eliminó el reproceso de recibir y enviar nuevamente insumos de clientes que se habían enviado incompletos, al reorganizar todos los puestos y computadoras del área, ahora, hay más espacio y más organización, tanto de empleados, como de documentación y los costos de la ruta, como se mencionó, bajaron un 26%, ya que, se disminuyó el reenvío de faltantes a los clientes y por lo tanto, bajaron la salida de rutas.

REFERENCIAS

- [1] Singh J. et al. (2014). Implementation of 5S practices: A review. *Uncertain supply chain management* 2(3), 155-162.
- [2] Kumar K. et al. (2022). Implementation of 5S practices in a small scale manufacturing industries. *Materials today* 62(4).
- [3] Astuty E. y Sinaga A. (2021). 5S towards sustainable competitive advantage in franchise retail business. *IOP conference series: earth and environmental science* 729(1), 1-11.
- [4] Nandan A. et al. (2021). Cultivating effectiveness and efficiency using 5S methodology. *Advances in environment engineering and management* 41-52.
- [5] Imai M. (1986). *Kaizen*. Editorial Random House.

Análisis a las herramientas competitivas para el mejoramiento de la productividad a partir de una revisión de la literatura

Juan Camilo Gutiérrez¹
Sebastián García Méndez²
Zulay Yesenia Ramírez León³

¹ *Universidad de Investigación y Desarrollo*

^{2,3} *Unidades Tecnológicas de Santander*
Colombia

En este estudio se presenta un primer acercamiento a la definición de las herramientas competitivas para el mejoramiento de la productividad, particularmente de las metodologías Lean Manufacturing e Industria 4.0, teniendo en cuenta la relevancia de los constructos en el sistema productivo. Para tal fin el método utilizado fue la búsqueda documental en la base de datos de los artículos más representativos entorno a la temática, en mayor grado en el plano temporal 2015 – 2020 soportados en el software VosViewer. Los resultados evidencian que las herramientas más representativas en la metodología Lean Manufacturing son 5S, Control Visual, SMED, Diseño Celular, POKA YOKE, Kanban y TPM; por su parte, en la Industria 4.0 son Sistemas Ciber-Físicos CPS, Internet de las Cosas IoT, Big Data, Computación en la nube e Integración de sistema, así mismo, la sinergia de las metodologías en el marco de la consolidación del Lean 4.0. Las conclusiones evidencian que las dos filosofías pretenden mejorar la productividad, la eficiencia y la eficacia de los sistemas productivos, sin embargo, dado que Lean Manufacturing lleva más tiempo, se pueden encontrar definiciones y modelos más sólidos, posibilidad que no tiene Industria 4.0 como concepto reciente, pero dada la similitud y relación, lo que hoy es el estudio de herramientas y tecnologías, en el futuro debe redundar en modelos de aplicación más robustos y estándares. Esto se ve reflejado en los casos de estudio encontrados, donde para Lean Manufacturing son implementaciones estándar de modelos establecidos para diferentes herramientas, mientras que para Industria 4.0 son acercamientos con potencial en el desarrollo de los sistemas productivos.

¹ Ingeniero Industrial, Especialista en Gerencia y Gestión de Proyectos y Magíster en Administración.

Contacto: jgutierrez11@udi.edu.co

² Ingeniero Industrial y Magíster en Administración.

Contacto: sgarciam@correo.uts.edu.co

³ Ingeniera Industrial y Magíster en Ingeniería Industrial.

Contacto: zramirez@correo.uts.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las metodologías Lean Manufacturing e Industria 4.0 constituyen dos insumos relevantes para el mejoramiento de los procesos productivos, teniendo en cuenta lo expuesto por [1] en el marco de la entrega del máximo valor posible y [2] en relación al control de la cadena de valor contemplando el ciclo de vida del producto, por consiguiente, se infiere que la implementación idónea, eficaz y eficiente de los constructos mencionados en el plano empresarial se debe encontrar apalancada por herramientas, tal como lo expone [3], lo cual precisa la relevancia de la investigación en los entornos actuales.

En esta línea, el presente documento tiene como objetivo realizar un acercamiento hacia las metodologías en sentido macro, seguidamente la definición de las herramientas más representativas inherentemente vinculadas, teniendo en cuenta lo expuesto por diversos autores, posteriormente la exposición de casos prácticos en diferentes organizaciones, y finalmente la sinergia entre las temáticas mencionados, lo cual se configura como un futuro a corto y mediano plazo en la praxis empresarial contemplando la competitividad en los nichos de mercado.

2. MÉTODO

La presente investigación se fundamentó en la determinación de las herramientas más representativas de las metodologías de Lean Manufacturing e Industria 4.0, para tal fin la base de datos orientadora fue Scopus, en tal sentido, se aplicaron ecuaciones de búsqueda con los constructos tanto en inglés como en español, posteriormente se acotó la búsqueda a aquellos documentos que mencionaban una o varias tecnologías o herramientas específicas y finalmente se implementó un plano temporal de 5 años contemplando artículos de revisión o casos de estudio. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Revisión documental en base de Datos Scopus y ecuación de búsqueda

Ecuación de búsqueda Lean Manufacturing	Documentos	Ecuación de búsqueda Industria 4.0	Documentos
("lean manufacturing")	4384	"industr*" AND "4.0"	14158
(("lean manufacturing") AND ("HERRA*" OR "TOOL*"))	1363	(("industr*" AND "4.0") AND ("HERRA*" OR "TOOL*"))	1633
(("lean manufacturing") AND ("HERRA*" OR "TOOL*")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))	320	((("industr*" AND "4.0") AND ("HERRA*" OR "TOOL*"))) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))	538

En esta línea, se utilizó el software VOSviewer en el marco de realizar un análisis de co-ocurrencia, particularmente en las palabras clave, con el fin de obtener información sobre la estructura científica del campo de investigación, siendo presentados en las Figuras 1 y 2.

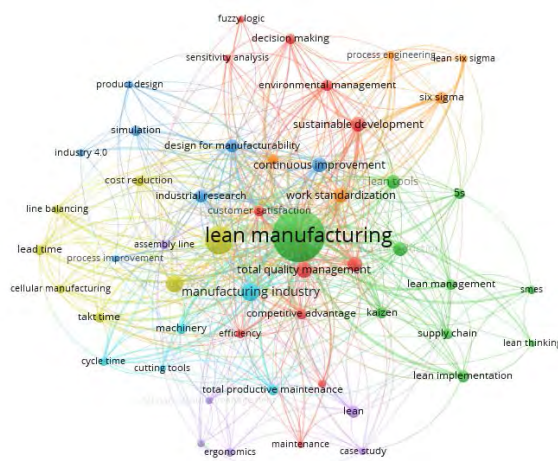


Figura 1. Diagrama de co-ocurrencia de palabras clave metodología Lean Manufacturing

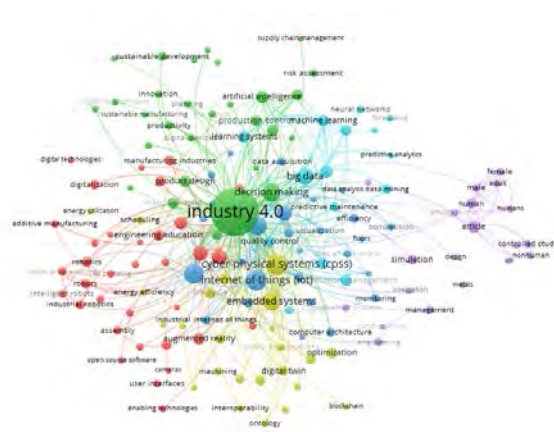


Figura 2. Figura 2. Diagrama de co-ocurrencia de palabras clave metodología Industria 4.0

Las figuras reseñadas posibilitan identificar herramientas relacionadas con las 5S, diseño celular, Kanban, TPM y sistemas ciber-físicos, internet de las cosas (IoT), el Big-Data, la inteligencia artificial, la simulación, la robótica, la nube, respectivamente. Preliminarmente estas fueron las tecnologías/herramientas que fueron tenidas en cuenta para el análisis de los diferentes artículos, esperando que fuera en estos documentos donde se confirmara su relevancia o en su defecto se evidenciara aquellas tecnologías/herramientas que más resaltaban dentro de las dos filosofías.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Antecedentes del Lean Manufacturing

La metodología Lean Manufacturing surgió a final de la Segunda Guerra Mundial, producto de la escasez de recursos productivos [4], siendo popular por [5], basada en las premisas de producir al menor costo, mitigar la existencia de los despilfarros o desperdicios, optimizar los procesos de producción [6, 7], propendiendo la disminución del tiempo de entrega del producto al cliente, incrementar la rentabilidad, aumentar el nivel de servicio, mejorar el tiempo de procesamiento y la motivación de los empleados [8].

En esta línea, se precisa definir el concepto de despilfarro, el cual [9] lo condicionan a *cualquier cosa que no sea el mínimo de cantidad de equipo, materiales, partes, espacio y tiempo que son absolutamente esenciales para agregar valor al producto*, siendo categorizados generalmente en 7 aspectos, a saber: sobreproducción (hacer producto antes, más rápido o en cantidades mayores a las requeridas por el cliente, ya sea interno o externo), tiempos de espera (operarios o clientes esperando por material o información), inventario (almacenamiento excesivo de materia prima, producto en proceso o producto terminado), transporte (mover material en proceso o producto terminado de un lado a otro), defectos (reparación de un material en proceso o repetición de un proceso), procesos (esfuerzo que no agrega valor al producto desde el punto de vista del cliente) y movimientos innecesarios (cualquier movimiento de personas o máquinas que no agreguen valor al producto o servicio) [10].

De igual manera, es necesario precisar que el sistema de producción Lean es considerado como un referente de efectividad y competitividad en el plano empresarial [4], teniendo en cuenta lo propuesto por [11, 12] referente a los principios orientadores de la filosofía, a saber, valor bajo la perspectiva cliente, cadena de valor, flujo continuo, producción óptima y mejora continua. En complemento, [13] plantean los siguientes elementos:

- Retroalimentación del proveedor: Críticas y desempeño referente a los productos o servicios recibidos de los clientes, vislumbrando la comunicación con el proveedor.
- Entrega justo a tiempo: Los proveedores deben entregar solo la cantidad requerida de los insumos en el momento especificado.
- Desarrollo de los proveedores: Consolidación de relaciones gana a gana entre los actores involucrados en el proceso productivo.

- Participación del cliente: Reconocimiento claro y conciso de las necesidades y expectativas de los clientes.
- Sistema Pull: Orientación de la empresa conforme a las necesidades y expectativas expresadas por el cliente.
- Flujo continuo: Movimiento constante e idóneo del producto en las diferentes estaciones de trabajo del sistema de producción.
- Reducción de tiempos: Minimización de los tiempos de configuración de los diversos recursos productivos.
- Mantenimiento total productivo: Evitar fallas de los diferentes recursos productivos.
- Control estadístico del proceso: Mitigación de los defectos en los diferentes subprocesos del sistema productivo.
- Participación de los empleados.

3.2 Antecedentes de la Industria 4.0

El término de industria 4.0 fue propuesto por Alemania en 2011 [14, 15] como parte de su estrategia de Plan de Acción Estrategia de Alta Tecnología 2020 [16] convirtiéndose rápidamente en el término utilizado por muchos países al denominar la integración entre los ambientes físicos y virtuales para crear productos inteligentes, una producción inteligente y servicios inteligentes [17]. Es de allí que en la unión europea en el marco de programa Horizon 2020 ha decidido fomentar la investigación en el campo de las tecnologías inteligentes [18]. Sin embargo, es de resaltar que no solo Alemania dio una denominación a este fenómeno, Estados Unidos con su Iniciativa de Internet Industrial CII [17] y la Asociación de fabricación avanzada, China con su la iniciativa Internet Plus o Made in China 2025 [19], la Nouvelle France Industrielle en Francia y RIS3 en fabricación avanzada de España [20], tienen el mismo rumbo.

Antes o después de Industria 4.0 muchas iniciativas apuntan a dar forma a una filosofía en últimas pretende aumentar las ganancias en productividad y reducciones de costo [21] lo cual eventualmente impulsar el desarrollo de las naciones y es por esto que muchos países han emprendido diferentes políticas y estrategias para potenciar las investigaciones en materia de desarrollo tecnológico e innovación, promover la fabricación inteligente, se esfuerzan por lograr la transformación y la modernización de sus industrias manufactureras [22, 23].

La definición como el concepto 4.0 surge al equipararla con la denominada cuarta revolución industrial, evidenciando 4 hitos relevantes dentro del desarrollo histórico de la industria como la conocemos; con una primera revolución industrial caracterizada por la necesidad de mecanizar los procesos, la segunda revolución industrial que surge por la masificación de la producción y la tercera revolución industrial con la automatización las líneas de producción basado en la electrónica y la informática.

Actualmente no hay una definición concreta que describa que es industria 4.0 [24], según [25] responsables del primer postulado de esta filosofía, la definen como *es la integración técnica de sistemas ciber-físicos en la manufactura y la logística y el uso del Internet de las cosas y de los Servicios en los procesos industriales* seguido por múltiples autores alrededor del mundo donde convergen en el postulado de que industria 4.0 pretende dentro de una estructura modular denominada Smart Factories [26] integrar los ambientes físico-digitales través de Sistemas Ciber-Físicos CPS. [27] crea una copia virtual del mundo físico y toma decisiones descentralizadas [24], llevando a los procesos industriales a un nivel de autonomía máximo donde a través del Internet de las cosas IoT se optimiza en el que la comunicación hombre-máquina [20, 17].

Dada la posibilidad de recolección y análisis de grandes volúmenes de información Big Data [27, 28] Industria 4.0 no representa la creación sino la integración de tecnologías/herramientas que independientemente no generan un impacto relevante, pero cuando se usan juntos en un contexto de aplicación industrial, su valor agregado brinda nuevas posibilidades [20]. En un sentido más amplio [29] expone que industria 4.0 no solo tiene influencia en la manufactura, al estar equiparada con la cuarta revolución industria significa un impacto en la sociedad civil, las estructuras de gobierno y la identidad humana, además de las ramificaciones económicas y de fabricación.

Para entender de mejor forma en que consiste industria 4.0, [20] mencionan los aspectos claves que la conforman el concepto son: son la digitalización, la optimización y la personalización de la producción; automatización y adaptación; interacción hombre-máquina (HMI); servicios y negocios de valor agregado, y comunicación e intercambio automático de datos, entendiendo que no se trata únicamente de un asunto tecnológico y de algoritmos avanzados sino representan un proceso industrial de valor agregado y gestión del conocimiento [24].

3.3 Herramientas más representativas de la metodología Lean Manufacturing

[3] plantea que la implementación de los procesos de la metodología Lean Manufacturing se encuentra altamente influenciada por el uso de técnicas y herramientas, las cuales son ajustables al microentorno de las empresas [30], teniendo presente la coordinación y los sistemas productivos [3, 31]. Al respecto [32] categoriza los instrumentos en 5 grupos: flujo del proceso, organización y cultura, control del proceso, indicadores y logística. En este contexto, la Tabla 2 presenta las diferentes herramientas inherentemente participantes en la metodología descrita.

Tabla 2. Consolidación de Herramientas Lean Manufacturing

Herramientas	[33]	[34-36]	[37]	[38]	[10]
5S	+	+	+	+	+
Certificaciones de calidad	+	+	+		
Estandarización	+	+		+	
Control visual	+	+	+	+	+
KAIZEN	+	+		+	+
SMED	+	+	+	+	+
Value Stream Mapping (VSM)	+	+		+	+
Diseño celular	+	+	+	+	+
Gestión energética	+				
Poka Yoke	+	+	+	+	+
Kanban	+	+	+	+	+
Just in Time	+	+	+		+
TPM	+	+	+	+	+
Benchmarking	+				
Six Sigma	+			+	+
Flujo continuo	+	+			
Jidoka		+			+
Ingeniería concurrente		+			
Gestión con el cliente		+			
Participación de la persona		+			
Sistemas de información flexibles		+			
Lead time		+			
Layout		+		+	
Heijunka		+			
Simulación		+			
Integración con la cadena de suministro		+			
Takt time		+			
Gestión con el proveedor				+	

La Tabla presentada permite observar que las herramientas más representativas son: 5S, Control Visual, SMED, Diseño celular, Poka Yoke, Kanban y TPM, por consiguiente, se configuran como el foco principal de este capítulo.

3.3.1 5S

Herramienta enmarcada en 5 tópicos, a saber, clasificación (Búsqueda de artículos útiles e inútiles, con el propósito lograr una categorización idónea, considerando la criticidad del mismo), orden (Organización de los artículos útiles correctamente, contemplando el desecho en los casos necesarios y visionando la semaforización), limpieza (Limpieza del sitio de trabajo, así mismo, retiro de la basura o suciedad correctamente), estandarización (Mantenimiento y mejora de los tópicos de clasificación, orden y limpieza) y disciplina (Motivación de los grupos de trabajo y fomento de la autodisciplina) [10, 39].

Por su parte, [38] plantea diversos beneficios, tales como, el fomento al mantenimiento del espacio de trabajo, el cual propende la reducción del consumo de insumos y la motivación a los empleados, eficiencia entorno a los recursos energéticos y materiales, localización proactiva de problemas en el área productiva, mejora en la manipulación y almacenamiento de materia prima, producto en proceso y producto terminados, condiciones idóneas de seguridad industrial producto de las áreas de trabajo limpias y libres de accidentes, entre otros.

3.3.2 Control visual

Herramienta orientada a la demarcación de áreas, materiales, productos, equipos y programas de producción en el marco de lograr en un corto tiempo la evaluación de los procesos ejecutados [10], contemplando el uso de un instrumento denominado Andon, el cual posibilita la detención de la línea de producción en los momentos críticos, teniendo como premisa la reducción y la eliminación de recursos innecesarios [38]; al respecto [40] plantean la promoción en temáticas vinculadas al control y el rendimiento, así mismo, denotan que un sistema con las características reseñadas puede recopilar información de múltiples fuentes y usar diversos medios de procesamiento, con el propósito de generar una gestión inteligente y objetiva del sistema. En esta línea [41] precisan una serie de ventajas:

- La visualización de información en sitios críticos del sistema de producción.
- Incremento de la participación del personal en los procesos, teniendo en cuenta el reconocimiento continuo del rendimiento operativo en comparación con las metas y objetivos trazados.
- Motivación de los empleados producto de la transparencia del proceso.
- Mejor seguimiento en las estaciones de trabajo, materiales y equipos.

3.3.3 SMED

Herramienta vinculada a la reducción de los tiempos de preparación de las máquinas, contemplando la estandarización de mecanismos y anclajes y la eliminación de tiempo ocioso [10] visionando la mitigación de despilfarros acotados a la sobreproducción e inventarios, y aspectos inherentes a temáticas ambientales, tales como fugas de petróleo, emisiones de polvo y gases químicos hacia la atmosfera [38].

[42] reconocen que es una herramienta ampliamente utilizada en procesos vinculados a la electrónica, la alimentación y la metalmecánica, teniendo presente la premisa de cambio de operaciones en menos de 10 minutos, generando reducciones en los tiempos estándar de hasta un 35%, no obstante, la aplicación depende de las condiciones de cada sistema productivo, en tal sentido, se menciona que con frecuencia las operaciones de cambio en alto porcentaje de las organizaciones se clasifican en externas e internas, las primeras se refieren a aquellas que se pueden realizar mientras la máquina se encuentra en funcionamiento, y las segundas vinculadas a la máquina detenida.

3.3.4 Diseño Celular

Herramienta referente a la constitución de células de trabajo para la producción de una serie de partes o productos, posibilitando el flujo continuo en el interior de un sistema productivo [10] lo cual contribuye a la reducción de los tiempos de espera y fomenta la optimización de los recursos empresariales [38], al respecto [43] precisan que una célula de fabricación puede estar compuesta por equipos con diversos modos de control, tales como: manual, híbrido y automático, particularmente, los operadores humanos agregan el componente de flexibilidad en procesos con alta complejidad e incertidumbre, en otros términos, integran la cognición y la destreza, aspectos difíciles de automatizar, para tal fin algunas de las funciones ejecutables son: la inspección, el ajuste de la máquina, el transporte de materia prima, entre otros.

3.3.5 POKA YOKE

Herramienta relacionada a la instalación de dispositivos para detectar errores en un sistema productivo, vinculando la notificación y alerta a un operario o grupo de colaboradores [44, 10], en tal sentido, se resalta la capacidad de identificar la causa principal, lo cual posibilita mejorar en un corto instante de tiempo la

falla presentada y no en un posterior escenario, a saber, el momento de verdad con el cliente; categóricamente se denotan tres tipos, tales: físicos, funcionales y simbólicos [44].

3.3.6 KANBAN

Herramienta vinculada a un sistema de control y programación sincronizada de la producción por medio de tarjetas, las cuales se constituyen como el canal de difusión concerniente al flujo del producto en el sistema productivo [10], operativamente impacta la reducción de inventarios, teniendo en cuenta que permite la movilización de materiales contemplando las necesidades de fabricación [38], al respecto [45] contempla la alta alineación con el justo a tiempo, configurando un efecto conjunto de la práctica reseñada. [45] precisa que la tarjeta proporciona la autorización para pedir o producir pieza, en otros términos, *toma uno, haz uno*, así mismo, se vinculan componente de la gestión visual del sistema productivo.

3.3.7 TPM

Herramienta orientada a la eliminación de las averías, contemplando la participación y la motivación de los empleados, vislumbrando la efectividad y el mejor uso de los equipos [10] lo cual inherentemente vincula la longevidad, producto de la baja necesidad de reemplazo y bajo impacto ambiental, así mismo, el mantenimiento preventivo y correctivo en el marco de evitar fallas y reprocesos, permitiendo lograr una potencial optimización en los despilfarros, la energía y la materia prima, e incrementa las condiciones de seguridad industrial, debido a la incursión de tecnología en la maquinaria [38].

Por otra parte, [46] precisan ventajas entorno al costo óptimo durante el ciclo de vida del equipo, y el rol sistémico y holístico en la organización, lo cual propende la búsqueda continua de la productividad, teniendo en cuenta el máximo aprovechamiento productivo y la minimización de interrupciones, resaltando para tal fin el desarrollo de dos fases concernientes a la eficiencia y auto mantenimiento, respectivamente.

3.4 Tecnologías/Herramientas más representativas de la industria 4.0

Para que industria 4.0 cumpla con los principios de interoperabilidad, virtualización, descentralización, capacidad en tiempo real, orientación de servicio y modularidad [47] diferentes autores han propuesto cuales son las tecnologías/herramientas que conforman industria 4.0, la Tabla 3 da cuenta de las coincidencias identificadas y evidencia las tecnologías/herramientas más relevantes.

Tabla 3. Consolidación de Herramientas Industria 4.0

Tecnología/Herramienta	[25]	[28]	[24]	[20]	[48]	[49]	[50]
Sistemas Ciber-Físicos CPS	+	+	+	+	+	+	+
Internet de las Cosas IoT	+	+	+	+	+	+	+
Smart Factories			+				
Big Data y Analytics		+	+	+	+		+
Nube (Cloud computing)		+		+	+	+	+
Simulación		+					+
Ciber-seguridad		+		+			+
Realidad Aumentada RA		+					
Realidad Virtual RV							+
Robots Autónomos		+		+			+
Visual computing				+			
Comunicación maquina a máquina M2M							+
Automatización Industrial				+			
Tecnologías de información y las comunicaciones TIC					+		
Integración de Sistemas	+	+		+		+	

Según la información consolidada, las tecnologías/herramientas que más se han asociado al concepto de industria 4.0 son Sistemas Ciber-Físicos CPS, el Internet de las Cosas IoT, el Big Data, la computación en la Nube y la Integración de Sistemas, resultado que coincide con el Diagrama de red de co-occurrence para herramientas Industria 4.0 delimitado mostrado anteriormente en este documento.

3.4.1 Sistemas Ciber-Físicos CPS

El concepto CPS fue expuesto por [51] mencionando que los CPS son integraciones de computación y procesos físicos. Las computadoras y redes integradas monitorean y controlan los procesos físicos, generalmente con bucles de retroalimentación donde los procesos físicos afectan los cálculos y viceversa. Posteriormente, este concepto fue adoptado fácilmente en Europa por Alemania en la iniciativa Industrie 4.0 y luego por la UE en su programa marco de investigación H2020. CPS se refiere a la convergencia de los mundos físico y digital. Cuando se aplica a la producción, CPS se especializa en sistemas de producción ciber-físicos CPPS [20].

Los CPS son sistemas de automatización industrial innovadores creados a partir de la integración perfecta de algoritmos computacionales y componentes físicos [49], por medio de la red para permitir la conexión de las operaciones de la realidad física con las infraestructuras informáticas y de comunicación. [24] obteniendo procesos de fabricación interoperables, integrados, adaptados, optimizados, orientados a servicios [52, 53] que generan una mejor calidad del producto y confiabilidad del sistema con equipos de fabricación más inteligentes y resistentes. [27]. Para lograr esta visión, es necesario capturar, analizar e interactuar con los mundos de producción real (física) y virtual (digital / cibernética), con un alto nivel de precisión en todas las dimensiones (espacial y temporal) [20].

CPS consta de dos componentes funcionales principales: 1) la conectividad avanzada que garantiza la adquisición de datos en tiempo real del mundo físico y la retroalimentación de información desde el ciberespacio; y 2) gestión inteligente de datos, análisis y capacidad computacional que construye el ciberespacio [27]. CPS puede desarrollarse aún más para gestionar Big Data y aprovechar la interconectividad de las máquinas para alcanzar el objetivo de contar con máquinas inteligentes, resistentes y autoadaptables [27], sistemas de almacenamiento e instalaciones de producción que pueden intercambiar información con autonomía e inteligencia, capaces de decidir y desencadenar acciones y puedan controlarse mutuamente de forma independiente [20].

3.4.2 Internet de las Cosas IoT

Internet, es una columna vertebral en el desarrollo de la industria 4.0, prácticamente gestiona la información en todos los aspectos, y de este bloque se delinearán otros, como la nube, la seguridad cibernética, la simulación y la realidad aumentada, aunque en menor medida [28]. A través del internet de las cosas, los sistemas pueden interactuar entre sí y con los humanos en tiempo real. El internet de los servicios IoS es el medio mediante el cual es posible ofertar y acceder a éstos [21].

El IoT integra varios dispositivos y sensores equipados con capacidades de detección, identificación, procesamiento, comunicación y trabajo en red, que a través de controladores centralizados comunican la información de equipos, componentes, productos, servicios, procesos, etc., tanto en la empresa como a lo largo de la cadena de suministro para ofrecer productos específicos y personalizados [24, 28, 54].

IoT y CPS dependen en gran medida de Internet móvil y redes de telecomunicaciones, que hasta ahora no han desempeñado un papel importante en la comunicación industrial. Para esto las empresas industriales y de telecomunicaciones proponen plataformas para múltiples operaciones, como compras con software denominado Planificación de recursos empresariales ERP y gestión de relaciones con clientes CRM [55] considerando las necesidades de automatización industrial y el desarrollo de redes 5G. Ambos desarrollos, junto con el modelado de información semántico y unificado basado en estándares web, podrían cambiar la estructura de las redes industriales, y podrían ser el requisito previo para implementar realmente IoT industrial IIoT y CPS. [17]

3.4.3 Big Data y Analytics

La importancia del Big Data radica en la generación y el uso de datos en el nuevo panorama industrial para responder a los cambios y fluctuaciones a través de plataformas conectadas de manera rápida y eficiente. El uso cada vez mayor de sensores, sistemas de adquisición de datos basados en internet de las cosas,

robots, inteligencia artificial y la generación de información en la nube y redes de computadoras ha dado como resultado la generación continua de datos de alto volumen que se conoce como Big Data, el cual tiene un crecimiento que va de la mano con otros bloques de la industria 4.0 [27, 28].

Big Data no es solo la recolección y gestión de información, a nivel estratégico ha cobrado una gran relevancia debido a que si las decisiones se toman sin análisis, el tiempo de respuesta se prolongaría y en la mayoría de los casos son ineficientes, para hacer más eficiente el proceso de toma de decisiones y aumentar la productividad se utilizan herramientas analíticas avanzadas para considerar factores no visibles y generar sistemas conscientes y autosustentables [56, 28] en este sentido, el análisis de la información es un elemento importante en la creación de valor procesos [57] pues la generación de datos ocurre en todos los procesos productivos [58] donde se requiere propuestas de organización y coordinación autónomas [53].

3.4.4 Cloud Computing

Computación en la nube está relacionada con tecnologías/herramientas ya mencionadas, y sería la encargada de proveer las soluciones para el almacenamiento y procesamiento de estos grandes volúmenes de datos [21] permitiendo a los administradores almacenar datos en la nube e implementar nuevos sistemas para monitorear y controlar procesos a través de plataformas digitales, garantizar su disponibilidad y capacidad de respuesta desde cualquier ubicación que cuente con acceso a Internet [59] lo cual implica construir una estructura de ciberseguridad de alto nivel de seguridad basada en IoT para la Industria 4.0 debido a la complejidad del proceso dinámico de gestión en torno a la colaboración de máquina a persona [59].

Cuando se habla de computación en la nube, la idea se divide en dos modelos diferentes [60]:

1. El modelo de implementación, que se refieren a la ubicación y gestión de la infraestructura de la nube para la conectividad y hospedaje
2. El modelo de servicio, que consisten en los tipos de servicios específicos a los que puede acceder en una plataforma de Cloud Computing, lo cual corresponde a las aplicaciones que son de interés para los usuarios.

Según Gerardo Villafranco de la revista Forbes, México: los principales usos del Cloud Computing se refieren a administración de la base de datos la gestión del correo electrónico, inteligencia de negocio, gestión de relaciones con clientes CRM y planificación de recursos empresariales ERP [60]. El siguiente paso en el desarrollo de la computación en la nube es la ingeniería de fabricación en la nube definida por software que se enfocará en ajustar y mejorar los aspectos operativos de la arquitectura y la efectividad combinada con agilidad, interoperabilidad, configurabilidad, programabilidad e integración [24, 59] lo cual busca una integración heterogénea de dispositivos y generación de datos [28].

3.4.5 Integración de sistemas

La visión de la integración de sistemas es crear un escenario de colaboración entre ingeniería, producción, proveedores, marketing y operaciones de la cadena de suministro, considerando los niveles de automatización y flujo de información [28] propone cambios estructurales en la organización y gestión de objetos físicos, así como en el establecimiento de conexiones con sistemas de información. Esta integración se da de tres formas: La realización de tres formatos de integración: integración horizontal, integración vertical e integración de extremo a extremo [25, 20, 53].

La integración vertical permite utilizar CPS para crear sistemas de fabricación flexibles con máquinas inteligentes forman un sistema auto organizado que puede reconfigurarse dinámicamente para adaptarse a diferentes tipos de productos; y la información masiva se recopila y procesa para hacer que el proceso de producción sea transparente [53]. Se refiere a la integración de varios sistemas de TI en diferentes niveles jerárquicos [25] durante un proceso de fabricación que conforman un sistema de fabricación flexible y reconfigurable [20, 53].

La integración digital de extremo a extremo (End-to-end digital integration) se refiere a una visión holística de ingeniería digital para la creación de valor centrado en el producto, cuyo objetivo es cerrar la brecha entre el diseño y la fabricación del producto y el cliente (gestión del ciclo de vida del producto) [20], lo que implica una cadena de actividades, como la expresión de los requisitos del cliente, el diseño y desarrollo del producto, la planificación de la producción, la ingeniería de producción, la producción, los servicios y el mantenimiento [53].

La integración horizontal se refiere al uso de estas tecnologías para intercambiar materiales, energía e información tanto dentro de una empresa y generar un sistema de gestión de recursos, logística, marketing y cadena de valor entre varias empresas diferentes [25, 20] como un ecosistema eficiente, donde pueden surgir nuevas redes de valores como modelos de negocios [53].

3.5 Sinergia entre Tecnologías/herramientas del Lean Manufacturing y la Industria 4.0

Se ha evidenciado hasta el momento que las tecnologías y herramientas representativas de cada filosofía le apuntan al incremento en los niveles de productividad, eficacia y eficiencia de los sistemas productivos [61], bajo la premisa de que lean pretende crear procesos eficientes y orientados a objetivos [62] que acorten los plazos de entrega y reduzcan el desperdicio e Industria 4.0 otorga herramientas de apoyo con nuevas aplicaciones de uso de la información que hacen que los procesos sean más claros o más transparentes para el usuario del proceso [63].

Sin embargo, la diferencia temporal en la que surge cada una de las filosofías da muestra del progreso de su implementación, las empresas han evolucionado a través de un proceso de aprendizaje y establecido procesos de producción estandarizados como Lean Production Systems LPS o cualquier otra práctica recomendada para su fabricación [64] y por tanto aplicar industria 4.0 significa entrar en sintonía con ese hecho, lo que significa que cualquier adaptación digital afecta a los sistemas de producción existentes como el LPS [64].

Por esta razón algunos autores han realizado estudios que proponen que herramientas del Lean Manufacturing podrían trabajarse en conjunto con las tecnologías/herramientas la industria 4.0, de tal forma que se pueda evidenciar en la práctica dicho relacionamiento. La Tabla 4 muestra las relaciones identificadas en esta investigación junto con los autores que las proponen.

Tabla 4. Herramientas y tecnologías vinculadas en Lean Manufacturing e Industria 4.0

	CPS	IOT	Big Data	Cloud Computing	INTEGRACIÓN DE SISTEMAS
5S		[66]	[64]		
CONTROL VISUAL		[65, 67]		[62]	
SMED					[64]
DISEÑO CELULAR	[61]	[68]			
POKA YOKE	[65]	[66]			
KANBAN	[61]	[65, 69]	[62]	[62]	
TPM		[66]		[67]	

En el ejercicio realizado se pudo avizorar que si bien hay propuestas de cómo se podrían trabajar en común algunas tecnologías y herramientas de ambas filosofías, la mayoría de los artículos tratan a nivel teórico cuales son las similitudes generales entre la industria 4.0 y el Lean Manufacturing, en ocasiones denominándolo Lean 4.0 [67], pero sin ningún ejemplo práctico de relacionamiento. Además, como lo muestran los espacios vacíos dentro de la tabla, no se encontró ejercicios para todas las herramientas relevantes, a lo que preliminarmente se podría inferir que se abre un amplio campo de acción para nuevas investigaciones en las que se mediante nuevas propuestas se pueda ampliar el horizonte de acción de una implementación conjunta de las dos filosofías.

3.6 Aplicaciones en estudios de caso

Las aplicaciones en el campo empresarial de las diferentes herramientas de Lean Manufacturing son muy diversas y amplias, particularmente, [70] analizaron en dos empresas inherentes a la industria de alimentos

y bebidas las 5S y el SMED, teniendo presente que en primer lugar se realizó una sensibilización de los empleados frente al proyecto y la temática, posteriormente se hizo un análisis detallado de las estaciones de trabajo, evaluando la organización del equipo, las herramientas y los documentos, así mismo, se aplicó una lista de verificación en el marco de la definición de acciones correctivas, concluyendo que el compromiso y el empoderamiento del empleado tienen un alto impacto en la metodología.

Al respecto, [71] realizaron un análisis de 7 empresas en temáticas afines al diseño celular, evidenciando que el proceso de implementación se basa en gran medida en la experiencia y el conocimiento del empleado en organizaciones previas, así mismo, logrando percibir que hay una aceptación hacia la metodología Lean Manufacturing; [72] aplicaron la herramienta Poka Yoke en el marco de la eliminación de los desechos o despilfarros de la línea de producción, alcanzando un incremento en la productividad y la eficiencia del 0,31% y 11,39%, respectivamente, teniendo como base la mejora en el control de tiempos producto de la observación y análisis del sistema de producción.

Por otra parte, [73] analizaron el efecto de la implementación de la herramienta TPM en 7 máquinas de CNC, considerando la sección de lavado, inspección y embalaje, así mismo, los requerimientos de los clientes, evidenciando positivos efectos en la tasa de rendimiento, los indicadores de calidad y la ratio de productividad; [74] plantearon un sistema de control visual, contemplando datos históricos sobre la iluminación de los edificios en el marco de incursionar enfoques interdisciplinarios e inteligentes; [75] realizaron un estudio referente al funcionamiento del sistema Kanban en multinacionales, pudiendo inferir la importancia de la alta dirección, los proveedores, la gestión del inventario, la mejora de la calidad y los costos operacionales.

Con respecto a aplicaciones de industria 4.0 En el marco del CPS y la Integración de Sistemas, un estudio realizado por [76] en el departamento de planificación de producción del sistema de producción de BIW evidencian que se necesita un digital twin basado en el CPPS para reducir el tiempo durante el proceso de integración de un vehículo nuevo.

La comparación de la información actual de CPPS contrastada con la información en el modelo digital permite calcular los tiempos de ciclo actuales de procesos individuales y líneas de producción, lo que apunta a cambios en el sistema de producción demostrando que el CPPS puede ofrecer una gran cantidad de información que los planificadores y asistentes de planificación autónomos necesitan de un digital twin para la planificación de la integración.

Con respecto a IoT, [77] buscaron mejorar la eficiencia de adquisición de la tecnología de adquisición de códigos de barras y la eficiencia de gestión de las empresas en Internet de las cosas. Los resultados de la investigación analizan la tecnología de códigos de barras en la capa de percepción de su arquitectura y combinar la tecnología de códigos de barras en la capa de percepción con el sistema ERP para establecer un sistema industrial automático de adquisición de códigos de barras basado en IoT, que es el uso integral de la tecnología de código de barras y el sistema ERP. De forma independiente o conjunta, puede obtener información del producto rápidamente, realizar estadísticas y análisis unificados en el sistema en segundo plano, lo que proporciona comodidad para la gestión empresarial.

Por otra parte, para llevar a la práctica el Big Data y la computación en la nube [78] exponen un caso de estudio en el que basado en el argumento de que, debido al movimiento actual hacia el acceso abierto y los datos abiertos, una cantidad cada vez mayor de datos se extrae de sus silos de información y se hace accesible como parte de lo que se denomina la nube de Datos Vinculados (Abiertos).

En el caso de estudio se propone el proyecto de investigación del 7PM de la UE SemaGrow el cual examinó soluciones para proporcionar formas más efectivas y transparentes de acceder a datos distribuidos. Su objetivo era desarrollar algoritmos e infraestructura para la consulta eficiente de federaciones a gran escala de fuentes de datos administradas de forma independiente, es decir, los nodos de la nube de datos vinculados, Estos estándares permiten compartir y reutilizar datos a través de aplicaciones y límites de la comunidad científica, y permiten la interconexión de datos en la nube LOD.

4. CONCLUSIONES

Tanto la metodología Lean Manufacturing como la Industria 4.0 proveen múltiples beneficios a las diferentes industrias, particularmente, se denota un incremento en los niveles de productividad, eficacia y eficiencia producto del mejoramiento del sistema productivo, no obstante, se debe reconocer que el efecto generado por las herramientas mencionadas depende en alto grado del compromiso de la alta dirección, la complejidad existente en el interior de las plantas de producción y las características del personal inherente de los procesos de manufactura, por consiguiente, se infiere un potencial campo de investigación en la temática reseñada en relación a las barreras e impulsores de las filosofías.

Las herramientas más representativas de la filosofía de Lean Manufacturing son: 5S, SMED, Control Visual, Diseño Celular, Kanban, TPM y Poka Yoke, lo cual permite identificar que las empresas de las diferentes industrias manufactureras aplican instrumentos complementarios en el marco de la eliminación o mitigación de los despilfarros en los sistemas productivos, en el caso de la Industria 4.0 las tecnologías/herramientas más relevantes identificadas fueron CPS, IoT, Big Data, Cloud Computing e integración de sistemas. A diferencia del Lean Manufacturing en la Industria 4.0 no se habla de metodologías sino de herramientas y tecnologías que a la fecha marcan el rumbo de lo que constituirá el futuro.

Visto desde este contexto, buscar la forma de relacionar las diferentes tecnologías y herramientas para crear los modelos de trabajo, puede ser el siguiente paso para poder llegar a una definición unificada de Industria 4.0 y ampliar su horizonte de implementación en cualquier sector, con la posibilidad de ser impartido desde la academia, tal y como sucede actualmente con Lean Manufacturing. Cabe resaltar que ya existen esfuerzos de autores que comprenden esta relación entre las dos filosofías y han hecho planteamientos en los que proponen como se deberían relacionar algunas de las herramientas y tecnologías del Lean Manufacturing y la Industria 4.0 para solucionar las problemáticas presentadas en los procesos industriales, sin embargo, al no encontrar suficientes ejemplos se infiere que puede ser otro campo de acción para futuras investigaciones.

Este argumento se ve reflejado en las aplicaciones de las herramientas de Lean Manufacturing donde se permite identificar que los procesos en gran medida inician con una revisión objetiva, sistémica y holística del sistema productivo en el marco de la definición idónea de la(s) herramienta(s) objeto de uso, seguidamente aspectos de sensibilización o capacitación al personal inherentemente vinculado a las acciones de intervención, puesta en práctica y evaluación de los efectos en los indicadores empresariales, siendo posible determinar un ruta para las propuestas de mejora en el plano organizacional. Este es el camino que están tomando las tecnologías y herramientas de la industria 4.0 bajo la premisa de que su potencial se dará con una implementación conjunta de varias ellas, sin embargo, se encuentran en la fase de desarrollo de experiencias aisladas, donde aún no hay suficiente claridad cuál debe ser esa teórica sinergia, sumado al hecho de que algunas de estas tecnologías y herramientas dependen de un avance tecnológico que apenas se está desarrollando.

REFERENCIAS

- [1] Villalobos I. et al. (2016). Mejora de Procesos Productivos mediante Lean Manufacturing. *Universia Business Review* 14(2), 263-277.
- [2] del Val Román J. (2012). Industria 4.0. La Transformación Digital de la Industria Española. *Coddiinforme* 120.
- [3] Chiarini A. (2014). Sustainable manufacturing-greening processes using specific Lean Production tools: An empirical observation from European motorcycle component manufacturers. *Journal of Cleaner Production* 85, 226-233.
- [4] Satolo E. et al. (2020). Techniques and tools of lean production: Multiple case studies in Brazilian agribusiness units. *Gestao e Producao* 27(1).
- [5] Womack J. et al. (1990). *The Machine that Changed the World*. Press.
- [6] Krajewski L. et al. (2013). *Operations management*. Elsevier.
- [7] Lucato W. et al. (2014). Performance Evaluation of Lean Manufacturing Implementation in Brazil. *International Journal of Productivity and Performance Management* 63(5).
- [8] Chauhan G. y Singh T. (2012). Measuring parameters of lean manufacturing realization. *Measuring Business Excellence* 16(3), 57-71.

- [9] Russell R. y Taylor B. (2000). *Operations Management*. Omega.
- [10] Mejia S. y Rau J. (2019). Analysis of improvement for the implementation of lean manufacturing tools in the clothing line of a textile company in Lima. En *Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities*.
- [11] Araújo F. et al. (2012). Evaluation of Lean Production System by using SAE J4000 standard: Case study in Brazilian and Spanish automotive component manufacturing organizations. *African Journal of Business Management* 6(49), 11839–11850.
- [12] Czifra G. et al. (2019). Lean Principles Application in the Automotive Industry Theoretical Background – Lean Management and Lean Factory. *Acta Polytechnica Hungarica* 16(5), 43–62.
- [13] Shah R. y Ward P. (2003). Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance. *Journal of Operations Management* 21(2), 129–149.
- [14] Faller C. y Feldmüller D. (2015). Industry 4.0 Learning Factory for regional SMEs. *Procedia CIRP* 32, 88–91.
- [15] Horváth D. y Szabó R. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change* 146, 119–132.
- [16] Vinicio M. et al. (2018). Modelos de evaluación de la madurez y preparación hacia la Industria 4.0: una revisión de literatura. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias* 11(20), 61–78.
- [17] Wollschlaeger M. et al. (2017). The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine* 11(1), 17–27.
- [18] Roblek V. et al. (2016). A Complex View of Industry 4.0. *SAGE Open* 6(2).
- [19] Müller J. et al. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change* 132, 2–17.
- [20] Posada J. et al. (2015). Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. *IEEE Computer Graphics and Applications* 35(2), 26–40.
- [21] Ynzunza C. et al. (2017). El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras Implications and Perspectives of Industry 4.0. *Conciencia Tecnológica* 8, 33–45.
- [22] Feng L. et al. (2018). Current problems in China's manufacturing and countermeasures for industry 4.0. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018(1), 90.
- [23] Jacquez M. y López V. (2018). Modelos de evaluación de la madurez y preparación hacia la Industria 4.0: Una revisión de literatura. *Year* 11(20), 61–78.
- [24] Lu Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration* 6, 1–10.
- [25] Kagermann H. et al. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group 4, 1–84.
- [26] Hermann M. et al (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. En *49th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- [27] Lee J. et al. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* 3, 18–23.
- [28] Saucedo J. et al. (2018). Industry 4.0 framework for management and operations: a review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 9(3), 789–801.
- [29] Sung T. (2018). Industry 4.0: A Korea perspective. *Technological Forecasting and Social Change* 132, 40–45.
- [30] Karim A. y Arif K. (2013). A methodology for effective implementation of lean strategies and its performance evaluation in manufacturing organizations. *Business Process Management Journal* 19(1), 169–196.
- [31] Pettersen J. (2009). Defining lean production: Some conceptual and practical issues. *TQM Journal* 21(2), 127–142.
- [32] Feld W. (2001). *Lean manufacturing: Tools, techniques, and how to use them*. Press.
- [33] Zhou B. (2012). Lean principles, practices, and impacts: A study on small and medium-sized enterprises (SMEs). *Krafcik*.
- [34] Bhamu J. y Sing K. (2014). Lean manufacturing: Literature review and research issues. *International Journal of Operations and Production Management* 34(7), 876–940.
- [35] Almeida G. y Abreu T. (2013). Implementing lean production systems: Research areas and opportunities for future studies. *International Journal of Production Research* 51(22), 6663–6680.
- [36] Krishma N. y Kodali R. (2014). A literature review of empirical research methodology in lean manufacturing. *International Journal of Operations and Production Management* 34(8), 1080–1122.
- [37] Mojib S. (2016). A survey on lean manufacturing implementation in a selected manufacturing industry in Iran. *International Journal of Lean Six Sigma* 7(2), 136–148.
- [38] Cherrafi A. et al. (2016). The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model. *Journal of Cleaner Production* 139, 828–846.
- [39] Yik L y Chin J. (2019). Application of 5S and Visual Management to Improve Shipment Preparation of Finished Goods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 530(1).
- [40] Steenkamp L. et al. (2017). Visual Management System to Manage Manufacturing Resources. *Procedia Manufacturing* 8, 455–462.

- [41] Bajjou M. et al. (2017). The potential effectiveness of lean construction tools in promoting safety on construction sites. *International Journal of Engineering Research in Africa* 33, 179–193.
- [42] Bin E. y Ito T. (2013). Integration of e-learning and simulation to user training programme of SMED. *International Journal of Internet Manufacturing and Services* 3(2), 121–136.
- [43] Cochran D. et al. (2017). Modelling of human-machine interaction in equipment design of manufacturing cells. *Enterprise Information Systems* 11(7), 969–987.
- [44] Abreu T. et al. (2012). A framework for assessing poka-yoke devices. *Journal of Manufacturing Systems* 31(3), 358–366.
- [45] Powell D. (2018). Kanban for Lean Production in High Mix, Low Volume Environments. *IFAC-PapersOnLine* 51(11), 140–143.
- [46] Roriz C. et al. (2017). Application of Lean Production Principles and Tools for Quality Improvement of Production Processes in a Carton Company. *Procedia Manufacturing* 11, 1069–1076.
- [47] Shafiq S. et al. (2016). Virtual Engineering Factory: Creating Experience Base for Industry 4.0. *Cybernetics and Systems* 47(1–2), 32–47.
- [48] Zhong R. et al. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering* 3(5), 616–630.
- [49] Xu L. et al. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research* 56(8), 2941–2962.
- [50] Moeuf A. et al. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research* 56(3), 1118–1136.
- [51] Lee E. (2008). Cyber Physical Systems: Design Challenges. En 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing.
- [52] Alcácer V. y Cruz V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 22(3), 899–919.
- [53] Wang S. et al. (2016). Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*.
- [54] Takano Y. et al. (2016). Unconnected component inclusion technique for patent network analysis: Case study of Internet of Things-related technologies. *Journal of Informetrics* 10(4), 967–980.
- [55] Gilchrist A. (2016). Middleware Industrial Internet of Things Platforms. *Industry 4.0* 44(8), 153–160.
- [56] Esmailian B. et al. (2016). The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems* 39, 79–100.
- [57] Kagermann H. (2015). Change Through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0. En Albach H. et al. (eds.), *Management of Permanent Change* (pp. 23–45). Springer.
- [58] Lee J. et al. (2014). Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. *Procedia CIRP* 16, 3–8.
- [59] Thames L. y Schaefer D. (2016). Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. *Procedia CIRP* 52, 12–17.
- [60] Galván P. et al. (2017). La nube al servicio de las pymes en dirección a la industria 4.0. *Pistas Educativas* 39(126), 85–98.
- [61] Prinz C. et al. (2018). Lean meets Industrie 4.0 - A practical approach to interlink the method world and cyber-physical world. *Procedia Manufacturing* 23(2017), 21–26.
- [62] Dombrowski U. et al. (2017). Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: A Use Cases Analysis. *Procedia Manufacturing* 11, 1061–1068.
- [63] Bauer H. et al. (2018). Integration of Industrie 4.0 in Lean Manufacturing Learning Factories. *Procedia Manufacturing* 23, 147–152.
- [64] Kolla S. et al. (2019). Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. *Procedia CIRP* 81, 753–758.
- [65] Kolberg D. y Zühlke D. (2015). Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. *IFAC*.
- [66] Hoellthaler G. et al. (2018). Digital Lean Production-An Approach to Identify Potentials for the Migration to a Digitalized Production System in SMEs from a Lean Perspective. *Procedia CIRP* 67, 522–527.
- [67] Mayr A. et al. (2018). Lean 4.0-A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. *Procedia CIRP* 72, 622–628.
- [68] Li F. et al. (2019). Integration of digitization trends in learning factories. *Procedia Manufacturing* 31, 343–348.
- [69] Bortolini M. (2017). Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework. *IFAC* 50(1), 5700–5705.
- [70] Borges, R. et al. (2015). Application of lean manufacturing tools in the food and beverage industries. *Journal of Technology Management and Innovation* 10(3), 120–130.
- [71] McLaughlin P. y Durazo I. (2013). Cellular manufacturing applications in MRO operations. *Procedia* 11, 254–259.
- [72] Mohd M. y Mohd N. (2018). A case study on the improvement of productivity and efficiency of a quality control line for a cutting tool manufacturer. *Journal of Mechanical Engineering* 5(1), 222–239.
- [73] Suryaprakash M. et al. (2020). Improvement of overall equipment effectiveness of machining centre using tpm. *Materials Today*. Apress.

- [74] Kar P. et al. (2019). ReVICEE: A recommendation based approach for personalized control, visual comfort & energy efficiency in buildings. *Building and Environment* 152, 135–144.
- [75] Abdul N. et al. (2013). Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation. *Procedia Economics and Finance* 7, 174–180.
- [76] Biesinger F. et al. (2019). A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin. *Procedia CIRP* 79, 355–360.
- [77] Liu K. et al. (2020). Internet of Things based acquisition system of industrial intelligent bar code for smart city applications. *Computer Communications* 150, 325–333.
- [78] Lokers R. et al. (2016). Analysis of Big Data technologies for use in agro-environmental science. *Environmental Modelling & Software* 84, 494–504.

Una propuesta de articulación de las normas NTC ISO 9001, NTC 6503 y NTSH 006 en establecimientos de alojamiento y hospedaje

Yuly Andrea Ujueta Castillo¹
Diana Cristina Martínez Silva²
Olga Lucia Obando Vargas³
Hernando Camacho Camacho⁴
Universidad Santo Tomás
Colombia

Bajo el contexto de sector hotelero relacionado con los establecimientos de alojamiento y hospedaje, el Gobierno Nacional ha venido implementado propuestas que impulsan iniciativas para mejorar la prestación de servicios. En este sentido, impulsa una serie de normas que respaldan teorías asociadas a la sostenibilidad y categorización de estrellas a través de las normas NTC 6503:2021 y NTSH 006:2009. Asimismo, los establecimientos de alojamiento y hospedaje implementan sistemas de gestión que contribuyen al reconocimiento comercial y un estatus en el mercado del sector. De esta manera, se identificó una oportunidad para articular las normas NTC-ISO 9001:2015, NTC 6503:2021 y NTSH 006:2009 formulando una propuesta que contribuya a la identificación de fortalezas, debilidades y beneficios económicos, de mercado y organizacionales. Para generar esta propuesta se establecieron tres fases: 1) identificación de las características comunes entre estas normas, 2) formulación de la metodología, y 3) validación de la propuesta de integración a través de un panel de especialistas. Esta propuesta fue validada a través de un panel de siete especialistas que contribuyeron al fortalecimiento de la metodología y que propusieron recomendaciones que incentivan el uso de esta herramienta en futuras investigaciones. A partir de la evaluación realizada por parte del panel de especialistas, a la metodología para articular las normas NTC-ISO 9001:2015, NTC 6503:2021 y NTSH 006:2009. Se concluye que la propuesta es viable y genera oportunidad a los establecimientos de alojamiento y hospedaje de obtener beneficios económicos, de mercado y de gestión al contar con un Sistema Integrado de Gestión.

¹ Administradora de Empresas, Especialista en Dirección y gestión de calidad, y Magíster en Calidad y Gestión integral.
Contacto: yu_ujueta_1981@hotmail.com, yulyjueta@usantotomas.edu.co

² Ingeniera Industrial, Especialista en Dirección y gestión de calidad, Especialista en Higiene y Salud Ocupacional, y Magíster en Calidad y Gestión integral.

Contacto: dianacrismartinez@hotmail.com, diana.martinezs@usantotomas.edu.co

³ Enfermera, Especialista en Gerencia de la calidad y auditoría en salud, Especialista en Dirección y gestión de calidad, y Magíster en Calidad y Gestión integral.

Contacto: Oguis2919@hotmail.com, olgaobandov@usantotomas.edu.co

⁴ Ingeniero Metalúrgico, Especialista en Administración de empresas y Magíster en Docencia e Investigación.

Contacto: hernandocamacho@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los datos generados a partir del reporte realizado por el Centro de Información Turística de Colombia CITUR, en el país existen 11.160 hoteles registrados [1], de los cuales, según los resultados de la encuesta ISO 2020 [2], tan solo 105 hoteles y restaurantes se encuentran certificados bajo la norma ISO 9001. Estos datos demuestran que, la proporción de hoteles certificados es muy baja en comparación a los hoteles registrados en la actualidad.

El gobierno nacional, con el objetivo de incentivar el turismo, ha respaldado iniciativas de certificación asociadas a la sostenibilidad a través de normas y lineamientos, generando para este propósito la Norma Técnica Sectorial Colombiana para Establecimientos de Alojamiento y Hospedaje, Requisitos de Sostenibilidad - NTS TS 002:2014, la cual se instituyó como obligatoria en la Resolución 3160 del 15 de octubre de 2015. A marzo de 2022, 184 hoteles se encontraban certificados bajo esta norma [3], sin embargo, la Resolución 1236 del 28 de junio de 2017, derogó la Resolución 3160, y la certificación en esta norma pasó de ser obligatoria a ser voluntaria.

En busca de mejorar la sostenibilidad de las actividades de todos los establecimientos de alojamiento y hospedaje, independientemente de su origen geográfico, cultural y social y contribuir a los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas [4], el Comité Técnico de Normalización Sostenibilidad para prestadores de servicios turísticos CTN 212, elaboró la Norma Técnica Colombiana, Sistema de gestión de la sostenibilidad para establecimiento de alojamiento, requisitos NTC 6503:2021, ratificada por el consejo directivo de ICONTEC el 17 de febrero de 2021, reemplazando así la Norma Técnica Sectorial Colombiana, Requisitos de sostenibilidad para establecimientos de alojamiento y hospedaje NTS-TS 002:2014.

Por otro lado, el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo emitió la Resolución 657 de 2005, por la cual se reglamenta la categorización por estrellas de los establecimientos hoteleros o de hospedaje que prestan sus servicios en Colombia, con el fin de generar un mecanismo mediante el cual se verifiquen las características de calidad en los servicios ofrecidos y de planta, que deben cumplir los hoteles en la escala de 1 a 5 estrellas, conforme a los requisitos establecidos en la Norma Técnica Sectorial de clasificación de establecimientos de alojamiento y hospedaje - Categorización por estrellas de hoteles, requisitos normativos NTS 006:2009 [5].

De acuerdo con lo anterior y de cara a la necesidad, de que los establecimientos de alojamiento y hospedaje tengan una mayor ventaja competitiva, se presenta una propuesta para articular el sistema de gestión de calidad NTC-ISO 9001:2015 con las normas NTC 6503:2021 y NTS 006:2009, lo anterior con el objetivo de facilitar la implementación y la certificación en estas normas a los establecimientos de alojamiento y hospedaje en Colombia. Es pertinente señalar que la integración e implementación de sistemas de gestión trae beneficios económicos, de mercado y organizacionales, mejorando la gestión y desempeño de los procesos de establecimientos de alojamiento y hospedaje promoviendo el mejoramiento continuo [6]

Con el objetivo de generar la articulación, se realizó una búsqueda bibliográfica de metodologías de integración asociadas a integración, dentro de las cuales se encontró: Anexo SL [7], PAS 99:2012 [8], Guía UNE 66177 [9] y Sistemas Integrados de Gestión. Una vez realizada la revisión y análisis de los contenidos de estas metodologías, se tomó como referencia, Sistemas Integrados de Gestión, para estructurar la propuesta asociada a la articulación de las normas NTC-ISO 9001:2015, NTC 6503:2021 y NTS 006:2009.

En este sentido, se definió las categorías, subcategorías y dimensiones que se señalan a continuación: Categorías: Factores claves estratégico, operativo y humano; subcategorías: P (Planear), H (Hacer), V (Verificar) y A (Actuar); dimensiones: estructura de alto nivel (contexto de la organización, liderazgo, planificación, apoyo, operación, evaluación de desempeño y mejora). Es importante tener en cuenta que bajo la metodología de integración elegida se determinó aplicarla hasta los factores claves.

Una vez generada la propuesta se compartió siete especialistas que evaluaron los criterios asociados a claridad, pertinencia y aplicabilidad. De acuerdo con los resultados de esta evaluación se realizó ajustes y se generó la propuesta final de articulación de las normas NTC-ISO 9001, NTC 6503 y NTS 006.

2. MÉTODO

Con el fin de encontrar la mejor manera para generar una propuesta que permita la articulación de las normas NTC-ISO 9001:2015, NTC 6503:2021 y NTSH 006:2009, se determinó que el enfoque para desarrollar la propuesta de articulación de estas normas es de tipo cualitativo [10] y se enmarca en un alcance descriptivo. La investigación se divide en tres fases:

1. *Fase 1:* Identificación de las características comunes entre estas normas, para ello se generó una matriz en Excel, en la cual se relacionaron los requisitos de cada una de las normas, generando de esta manera una segunda matriz en Excel con la integración de las mismas, teniendo en cuenta las categorías, subcategorías y dimensiones determinadas (Tabla 1).

Tabla 1. Categorías, subcategorías, y dimensiones para el desarrollo de la propuesta

Categorías	Subcategorías	Dimensiones
Factores claves de integración: Factor estratégico Factor operativo Factor humano	Ciclo de mejora continua PHVA:	Estructura de alto nivel
	Planear	Capítulo 4. Contexto de la organización
	Hacer	Capítulo 5. Liderazgo
	Verificar	Capítulo 6. Planificación
	Actuar	Capítulo 7. Apoyo
		Capítulo 8. Operación
		Capítulo 9. Evaluación del desempeño
		Capítulo 10. Mejora

2. *Fase 2:* La formulación de la metodología. Se basó en la identificación de los puntos comunes y no comunes de las tres normas, se identificó los aspectos a implementar y se generó las recomendaciones del cómo se deben implementar estos aspectos.

Así mismo, se proporcionó herramientas de consulta que obedecen a los anexos de la NTC 6503:2021 y la lista de requisitos asociada a la categorización por estrellas NTSH 006:2009. Estas herramientas se encuentran relacionadas con las subcategorías y dimensiones relacionadas con la propuesta de articulación.

3. *Fase 3:* Validación a través de un panel de especialistas. Se definió un cuestionario de evaluación para el panel especialistas teniendo en cuenta los siguientes criterios: claridad, pertinencia y aplicabilidad.

Esta propuesta de articulación fue validada por siete especialistas seleccionados acorde con las características del proyecto de investigación, para lo cual se utilizó un instrumento, cuya fiabilidad se evaluó a partir del coeficiente Alfa Cronbach [11] y la validez de contenido por coeficiente [12].

Este instrumento contiene los criterios de la Tabla 2 para evaluar la propuesta.

Tabla 2. Criterios de evaluación para el panel de especialistas

Criterios de evaluación	Criterios	Calificación de criterios
Claridad de la metodología propuesta	4	De 1 a 5 cuando:
Pertinencia de la metodología propuesta	2	1 - Está totalmente en desacuerdo.
		2 - Está en desacuerdo
		3 - Está de acuerdo, pero considera que se requiere ajustes
Aplicabilidad de la metodología propuesta	6	4 - Está de acuerdo
		5 - Está totalmente de acuerdo

De acuerdo con las observaciones entregadas por los especialistas se presentó una versión final de la propuesta de articulación, la cual beneficiará a los establecimientos de alojamiento y hospedaje.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para dar a conocer los resultados de la propuesta para integrar las normas NTC-ISO 9001:2015 con la NTC 6503:2021 y la NTSH 006:2009, a continuación, se relacionan los resultados en cada una de las fases descritas en la metodología.

3.1 Fase 1 - Identificación de las características comunes entre estas normas

Teniendo en cuenta los requisitos de la NTC-ISO 9001:2015, se relacionaron los requisitos de la NTC 6503:2021 y la NTSH 006:2009, dando paso a la construcción de la matriz de requisitos de las normas (Tabla 3), donde se identificó para cada uno de los requisitos el factor clave de integración (categorías), agrupándolos bajo el ciclo del PHVA (subcategoría) y la estructura de alto nivel (dimensión).

Tabla 3. Matriz de requisitos de las normas

Factores claves de integración	PHVA	Est. Alto nivel	Numeral ISO 9001	Numeral NTC 6503	Numeral NTSH 006	Articulación entre:
Categorías: Facto clave Estratégico	Subcategorías:	Dimensiones: Contexto de la organización Liderazgo				Conclusión de articulación entre las normas según lista desplegable: NTC-ISO 9001:2015 y NTC 6503 NTC-ISO 9001:2015 y NTSH 006
Factor clave Operativo	Planear Hacer Verificar	Planificación Apoyo Operación	Del 4 al 10	Del 4 al 10	Del 6 al 10	NTC-ISO 9001:2015, NTC 6503 y NTS H 006 NTC 6503 y NTS H 006
Factor clave Humano	Actuar	Evaluación del desempeño Mejora				Tema específico de la NTC-ISO 9001:2015 Tema específico de la NTC 6503 Tema específico de la NTSH 006

Una vez realizado este ejercicio con cada uno de los requisitos, se generó la matriz de integración (Figura 1), permitiendo visualizar los requisitos comunes y no comunes entre estas normas, dando lugar a la identificación de los aspectos a tener cuenta para su articulación.

SUB-CATEGORÍAS - PHVA	DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA DE ALTO NIVEL	REQUISITOS	CATEGORÍAS - FACTORES CLAVES PARA LA INTEGRACIÓN															
			ESTRATÉGICO			OPERATIVO			HUMANO									
			ISO 9001	NTC6503	NTSH006	ISO 9001	NTC6503	NTSH006	ISO 9001	NTC6503	NTSH006							
Contexto de la organización	Liderazgo																	
Planear	Planificación	Común																
Hacer	Apoyo	No Común																
Verificar	Operación																	
Actuar	Evaluación del desempeño																	
	Mejora																	

Figura 1. Matriz de integración

3.2 Fase 2 - Formulación de la metodología de integración entre las normas NTC-ISO 9001:2015, la NTC 6503:2021 y la NTSH 006:2009.

Se determinaron los conceptos asociados a cada factor de integración que se muestran en la Figura 2.



Figura 2. Estructura de articulación propuesta entre las normas NTC-ISO 9001:2015, la NTC 6503:2021 y la NTSH 006:2009 (Adaptado de [13])

- *Factor estratégico*: Este factor clave está asociado a contemplar los procesos y actividades relacionadas con el direccionamiento general y la gestión de la organización, entre ellos: la comprensión del contexto, la comprensión de las necesidades y expectativas de las partes interesadas, la gestión de riesgos y oportunidades, la asignación de los recursos, la evaluación del desempeño organizacional y la toma de decisiones.
- *Factor apoyo*: Este factor está asociado a contemplar los aspectos relacionadas con la cadena de valor para la oferta y realización de los productos y servicios, la gestión de la información documentada, la definición e implementación de mecanismos de seguimiento y medición y la ejecución de acciones de mejora continua
- *Factor humano*: Este factor está asociado a contemplar los elementos relacionadas con la cultura organizacional, el liderazgo y compromiso, la definición y comprensión de roles, autoridad y responsabilidad, el desarrollo de competencias, la motivación y la participación, la gestión de los conocimientos de la organización y la implementación de mecanismos de comunicación, con el fin de alcanzar la toma de conciencia en las personas.

Una vez definidos los factores, se procedió con la identificación de los requisitos comunes y no comunes de las normas por cada uno de los factores claves de integración, registrando en la propuesta lo que se debe tener en cuenta en cada uno de ellos, con respecto al ciclo PHVA y la estructura de alto nivel. En este sentido, se establecieron las actividades a desarrollar, es decir, lo que deben tener en el Sistema Integrado de Gestión y como propuesta de valor el cómo lo deben desarrollar, por ejemplo, herramientas, estrategias, métodos, entre otros instrumentos que se pueden utilizar para dar cumplimiento a las actividades que se deben realizar (Tabla 4).

Tabla 4. Metodología basada en los factores claves de integración bajo el marco del PHVA y la estructura de alto nivel

Factor clave estratégico					
PHVA	Estructura de alto nivel	Requisito	Qué debo tener	Cómo lo implemento	
P	Contexto de la organización	Común	Comprensión de la organización y de su contexto	Herramientas sugeridas: DOFA, PESTAL	
	Contexto de la organización	Común	Comprensión de las necesidades y expectativas de las partes interesadas	Caracterización de grupos de valor	
	Contexto de la organización	Común	Establecimiento, implementación, mantenimiento y mejorar continua del Sistema de Gestión Integrado	Mapa y caracterizaciones de proceso	
	Contexto de la organización	Común	Determinación del alcance del sistema de gestión integrado	Alcance del SGI	
	Contexto de la organización	No común	Cumplimiento de la legislación vigente atendiendo requisitos nacionales y particulares	Normograma - con las dimensiones de sostenibilidad (Económico, ambiental y social), tener en cuenta los requisitos laborales y tributarios para la matriz legal	
	Liderazgo	Común	Establecer, documentar, comunicar y tener disponible la política y los objetivos del Sistema Integrado de Gestión	A partir del análisis del contexto interno y externo, se puede determinar la política del SIG y establecer los objetivos teniendo en cuenta la planeación estratégica del Establecimiento de Alojamiento y Hospedaje. Definiendo las acciones para demostrar el compromiso de la alta dirección	
	Planificación	Común	Identificar oportunidades y riesgos para el Sistema Integrado de Gestión	DOFA, PESTAL Aplicación de la ISO 31000	
	Planificación	Común	Planificación del logro de los objetivos del Sistema Integrado de Gestión	Establecer plan estratégico que describa los objetivos integrales y determinar que, quien, cuando, cómo y los recursos asignados para lograr el cumplimiento de los objetivos establecidos	
	H	Apoyo	Común	Determinar y asignar los recursos para el Sistema Integrado de gestión	Identificar el recurso humano, ambiente de procesos, conocimiento, seguimiento y medición, conocimiento de la organización y la infraestructura necesaria para lograr el mantenimiento del SIG

V	Evaluación del desempeño	Común	Establecer revisiones del Sistema Integrado de Gestión por parte de la alta dirección, teniendo en cuenta información clave para la toma de decisiones	Realizar revisiones periódicas al desempeño del sistema de gestión definiendo entradas establecidas por las normas Documentar las decisiones que se tomaron por parte de la alta dirección reuniones o comités
---	--------------------------	-------	--	---

Factor clave operativo

PHVA	Estructura de alto nivel	Requisito	Qué debo tener	Cómo lo implemento
P	Planificación	Común	Identificación de riesgos y oportunidades del Sistema Integrado de Gestión	DOFA, PESTAL - identificación de cuestiones internas y externas - cuestiones de desarrollo sostenible. Tener en cuenta los anexos A, B y C para realizar el análisis de cuestiones internas y externas. Documentación de un procedimiento para identificar sus cuestiones de desarrollo sostenible y evaluar su importancia en relación con las actividades, productos y servicios del establecimiento de alojamiento dentro del alcance definido del sistema de gestión.
	Planificación	No común	Planificación de los cambios	Generar herramientas documentadas como por ejemplo manuales, instructivo, procedimiento y formatos que den línea para planear y controlar los cambios en la organización. Ejemplo: Establecer un instructivo con las directrices para la gestión del cambio y un formato para planificar las acciones que permitan controlar el cambio
H	Apoyo	Común	Documentar el alcance, la política, objetivos del Sistema de Gestión Integrado y la información de la operación de los procesos. Los documentos se deben crear, actualizar, revisar, aprobar y controlar.	Implementación de un Sistema de Gestión Documental - Tablas de Retención Documental.
	Apoyo	No común	Determinar, proporcionar y mantener el ambiente necesario para la operación y lograr la conformidad del servicio	Implementar el Decreto 1072 de 2015 Reglamento de trabajo (acciones para prevenir el error humano)
	Apoyo	No común	Recursos de seguimiento, medición y trazabilidad	Identificación de los equipos que requieren calibración o verificación, por ejemplo: balanzas, termómetros, Termohigrómetro, Luxómetro Hojas de vida de los equipos
	Operación	Común	Debe planificar, implementar y controlar los procesos necesarios para cumplir los requisitos para la provisión del servicio que presta el establecimiento de alojamiento	Identificar la cadena valor de los procesos, documentar la planificación (procedimientos) y trabajarlos bajo el modelo del PHVA Ver requisitos de la NTSH 006 para identificación de procedimientos operacionales del establecimiento de alojamiento y hospedaje de acuerdo con la categorización de estrellas
	Operación	Común	Determinar los requisitos y controles de los productos y servicios suministrados externamente	Selección y evaluación de proveedores - Aplicar Anexo C de la NTC 6503 Obligaciones contractuales asociadas a los requisitos de los productos o servicios del proveedor (Ambiental, sociocultural, económico)
Operación	No común	Comunicación con el huésped: Determinar los métodos para obtener información del huésped y comunicar los detalles del servicio. Propiedad del huésped	A través de la página web, correos, folletos, llamadas, encuestas, reuniones presenciales entre otras. (Ver norma ISO 9002:2017) Estrategias de comunicación	

				Política de tratamiento de datos Matriz de comunicaciones Procedimiento para la gestión de quejas y reclamos
	Operación	No común	Determinar, revisar y gestionar los cambios en los requisitos de los servicios del establecimiento de alojamiento y hospedaje	Matriz de requisitos misionales CLIO. Encuesta de satisfacción frente a lo ofrecido. Análisis de la información y su conservación. Implementar de estrategias asociadas a la comunicación en la prestación del servicio
	Operación	No común	Planificar el diseño y desarrollo del servicio, identificando las entradas y salidas. Formulando y ejecutando los controles y gestionando los cambios que se presenten en el diseño y desarrollo del servicio	Identificación de requisitos CLON (cliente, legal, organizacional y normativo) Documentar el proceso de diseño del servicio numeral 8.3 ISO 9001:2015, con sus controles. registros obligatorios
	Operación	No común	Determinar las características del servicio	Portafolio del servicio de acuerdo con las condiciones ofrecidas por el Hotel - Protocolos de servicios - procedimientos - diagrama de flujo Lista de chequeo para realizar seguimiento asociado al cumplimiento de las características del servicio. Procedimiento asociado al producto no conforme
V	Evaluación del desempeño	Común	Seguimiento, medición, análisis y evaluación de los procesos identificados en el establecimiento de alojamiento y hospedaje	KPI - Indicadores de eficacia Balance Score Card Conservar información documentada del desempeño de los indicadores - Fichas de indicadores Informes de gestión de los procesos y del sistema integrado de gestión Análisis de información asociada a la satisfacción del cliente y prestación del servicio
	Evaluación del desempeño	Común	Realizar auditorías internas integrales a los procesos	ISO 19011:2018- Directrices para la auditoría de sistemas de gestión Procedimiento para la planificación y ejecución de auditorías internas Reportes a la alta dirección
	Evaluación del desempeño	Común	Llevar a cabo la revisión por la dirección en periodos planificados	Documentar reuniones o comités con la alta dirección.
A	Mejora	Común	Mejora continua: Tratamiento de situaciones no conformes, productos no conformes, PQRS y demás.	Métodos de análisis causa raíz (Pareto, lluvia de ideas, espina de pescado) implementación de acciones correctivas, identificación de oportunidades de mejora Identificación de acciones de mejora Implementación y seguimiento de las acciones de mejora

Factor clave humano

PHVA	Estructura de alto nivel	Requisito	Qué debo tener	Cómo lo implemento
P	Liderazgo	Común	Creación del perfil de alto nivel para liderar la implementación del Sistema Integrado de Gestión (Generación de la política, perfiles, designación de recurso, mejora continua) -enfoque al cliente - no común	Descripción de las responsabilidades y funciones de la alta dirección, su compromiso y formas de evidenciar liderazgo - objetivos, asignación de recursos, modelo de presupuesto
	Liderazgo	Común	Definición de roles, responsabilidad y autoridades	Matriz de asignación de responsabilidad, riesgos operacional y matriz de calificación (Nivel de competencia) - Manual funciones
H	Apoyo	No común	Gestión del conocimiento - capturar el conocimiento	Planes de formación - programa mentores, identificación de lecciones aprendidas, <i>know-how</i> de la organización, documentar. Referenciación de procesos. NTC ISO 30401

Apoyo	Común	Documentar los perfiles de cargo	Manual de funciones
Apoyo	Común	Evaluación de desempeño	Autoevaluación, evaluación 360 grados, verificación de comportamiento, gestión por objetivos, revisión de pares
Apoyo	Común	Toma de conciencia	Plan de formación que contemple la sensibilización
Apoyo	Común	Comunicación interna y externa	Plan de comunicaciones

En cada uno de los factores claves de integración se incorporaron los anexos específicos de las normas NTC 6503:2021 (Anexos A, B y C) y NTSH 006:2009 (Lista de chequeo – requisitos por categorización de estrellas), debido a que son temas muy específicos de estas normas, sin embargo, se relacionan como listas de chequeo para que el establecimiento de alojamiento y hospedaje pueda identificar si cumple, no cumple o está en proceso de implementación (Tabla 5).

Tabla 5. Ejemplo de lista de chequeo en su proceso de implementación en la NTSH 006:2009

Factores de evaluación de la norma	Nombre del numeral	Requisito de cumplimiento NTSH 006	Aplica para las estrellas	Numerales de la NTSH 006 articulados	Estado
			De la 1 a la 5		Cumple No cumple En proceso

3.3 Fase 3 – Validación de la propuesta de integración a través de un panel de especialistas

La evaluación de la metodología propuesta cuenta con un panel de especialistas conformado por 7 profesionales, de los cuales el 86% tienen maestría en esta materia y el 14% cuenta con doctorado. Adicional a lo anterior, el 86% cuenta con experiencia mayor a 10 años, asociada a la metodología propuesta en esta investigación. Esta evaluación se remitió al panel de especialistas a través de correo electrónico y se realizó mesas de trabajo con algunos de ellos, con el fin de contextualizarlos frente a la herramienta enviada para su evaluación. Asimismo, se recibieron los resultados por este medio, los cuales fueron tabulados y analizados para determinar ajustes en la metodología propuesta.

Frente a las recomendaciones recibidas por el panel de especialistas, se adoptó la asociada al mejoramiento de las actividades que se deben tener en cuenta para dar cumplimiento a la integración de las normas. De esta manera se ajustó la metodología incluyendo en los factores claves estratégicos, de apoyo y humano elementos, herramientas o actividades relacionadas al *como lo implemento*. El resto de las recomendaciones, se encuentran asociadas a las actividades que se deben tener en cuenta para la implementación de las normas NTC-ISO 9001:2015, NTC 6503:2021 y NTSH 006:2009, las cuales se incluyeron en las conclusiones de este capítulo.

Con respecto a los resultados de la evaluación del panel de especialistas se definió aplicar el coeficiente de validez de contenido [12] y el coeficiente de alfa Cronbach [14]. Bajo el marco de la metodología de validez de contenido de [12], el cual permite valorar el grado de acuerdo de los especialistas respecto a cada uno de los diferentes ítems y al instrumento en general. Para ello, tras la aplicación de una escala tipo Likert de cinco alternativas, se calcula la medida obtenida en cada uno de los ítems y, en base a esta, se calcula el Coeficiente de Validez de Contenido CVC para cada elemento. Para su interpretación se recomienda mantener únicamente aquellos ítems con un CVC, superior a 0,80 [15].

De acuerdo con las calificaciones generadas por el panel de especialistas, los resultados asociados a los criterios de claridad y aplicabilidad obtuvieron una calificación de 0,88 y 0,84 respectivamente, lo cual corresponde a una interpretación de *validez y concordancia buena*. Frente al criterio de evaluación asociado a pertinencia, obtuvo 0,92, lo cual corresponde a una interpretación de *validez y concordancia excelente*.

En lo correspondiente al coeficiente de alfa de Cronbach [14], se aplicó con el fin de determinar la confiabilidad asociada a los resultados de los criterios evaluados por el panel de especialistas. De acuerdo con lo anterior, se estima que el valor mínimo aceptable para el coeficiente alfa de Cronbach corresponde a 0,70; por debajo de ese valor la consistencia interna de la escala utilizada es baja. Por su parte, el valor máximo esperado es 0,90; por encima de este valor se considera que hay redundancia o duplicación. Varios

ítems están midiendo exactamente el mismo elemento de un constructo; por lo tanto, los ítems redundantes deben eliminarse. Usualmente, se prefieren valores de alfa entre 0,80 y 0,90 [11].

Teniendo en cuenta lo anterior, el resultado obtenido bajo la aplicación del coeficiente de alfa de Cronbach corresponde a 0.8783. En este sentido, se interpreta que la aplicación de este coeficiente es confiable con respecto a la evaluación realizada por parte de los especialistas a la metodología de articulación de las normas ISO 9001:2015, ISO 6503:2021 y NTSH 006:2009.

Cabe resaltar que, en la revisión literaria, no se encontró documentos asociados a propuestas para articular las normas NTC-ISO 9001:2015, NTC 6503:2021 y NTSH 006:2009 para los establecimientos de alojamiento y hospedaje en Colombia, sin embargo, se revisó una propuesta semejante asociada a la implementación de la NTS-TS 002 y su integración con los criterios de la NTC-ISO 9001:2015 [16], en la cual señalan que los requisitos de la NTC-ISO 9001:2015 apoyan la gestión sostenible señalada en la NTS-TS 002.

Esta propuesta se enfocó en la implementación de la NTS-TS 002 en un hotel específico y no contempló la variedad de necesidades que pueden presentar los establecimientos de alojamiento y hospedaje. Se dan herramientas para validar el nivel de implementación de la NTS-TS 002 y se tiene en cuenta como factor de integración con la NTC-ISO 9001:2015, la gestión del riesgo bajo la metodología de la ISO 31000:2018, la gestión del cambio y la gestión documental, sin embargo, no se toman en su completitud los requisitos de la NTC-ISO 9001:2015 para integrarla con la NTS-TS 002. Es importante precisar que en la actualidad la implementación de la NTS-TS 002, ya no es de obligatorio cumplimiento.

El artículo mencionado anteriormente, apoya la propuesta realizada en esta investigación, desde las actividades que se deben tener en cuenta para realizar una integración entre las normas NTC-ISO 9001:2015, NTC 6503:2021 y NTSH 006:2009 [17]. Adicional a lo anterior, se destaca que la propuesta representa una ayuda importante en un campo en el cual no se han realizado estos estudios y que tiene un gran potencial de desarrollo para el país.

4. CONCLUSIONES

Se concluye que, de los 320 requisitos validados, el 39% son comunes entre la ISO 9001 y la NTSH 006 y el 29% son comunes entre la ISO 9001 y la NTC 6503. Tan solo el 16% corresponde a requisitos comunes entre las tres normas. Pese a la dificultad para articular las tres normas, debido a que cada establecimiento de alojamiento y hospedaje tiene necesidades diferentes, se logró plantear una propuesta de articulación que contiene los aspectos relevantes de las normas, bajo el marco de los factores claves de integración con respecto al ciclo PHVA y la estructura de alto nivel.

Adicional a lo anterior, la propuesta de articulación de las normas NTC-ISO 9001:2015, NTC 6503:2021 y NTSH 006:2009, consideró las herramientas básicas para determinar la integración de estas tres normas, apoyando a los establecimientos de alojamiento y hospedaje en Colombia a determinar e identificar fortalezas y debilidades en la gestión que desarrollan en cada uno de los factores claves de integración y de esta manera contribuir a la certificación bajo estas normas.

De acuerdo con lo anterior, la propuesta de articulación de la Norma NTC-ISO 9001:2015 con la NTC 6503:2021 y NTSH 006:2009 es viable, debido a que se considera como una herramienta que permitirá generar un factor diferenciador entre los demás establecimientos de alojamiento y hospedaje en Colombia en el momento en que se aplique.

Teniendo en cuenta los resultados de esta propuesta de investigación se recomienda aplicar la propuesta en los establecimientos de alojamiento y hospedaje con el fin de generar un análisis de los resultados de efectividad de esta. Asimismo, se podría articular con un cronograma para la implementación del Sistema de Gestión de Calidad SGC bajo la norma NTC-ISO 9001:2015 y adaptarlo con un autodiagnóstico.

Por otro lado, sería importante continuar con la investigación profundizando en temas asociados a costos y beneficios que traería la aplicación de la metodología propuesta.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Comercio Industria y turismo. (2021). Centro de Información Turística de Colombia. CITUR.
- [2] ISO. (2020). The ISO Survey of Management System Standard Certifications. International Organization for Estandarization.
- [3] Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2022). Registro nacional de turismo. Recuperado: <https://www.mincit.gov.co/minturismo/analisis-sectorial-y-promocion/registro-nacional-de-turismo>
- [4] ICONTEC. (2021). NTC 6503:2021 Sistema de gestión de la sostenibilidad para establecimientos de alojamiento. Requisitos. ICONTEC.
- [5] DNP. (2021). Resolución 0657. Departamento Nacional de Planeación.
- [6] Martínez D. et al. (2021). Beneficios de los sistemas de gestión y otros mecanismos para mejorar la calidad en el sector hotelero a nivel mundial. Recuperado: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/34907>
- [7] Viloría B. (2015). Fundamentos de la estructura de alto nivel. Recuperado: <https://www.isoexpertos.com/wpcontent/uploads/2016/10/Ebook-Fundamentos-de-la-EAN-RevA-Nov15.pdf>.
- [8] Miguel J. (2013). Especificación de los requisitos comunes del sistema de gestión como marco para la integración calidad-Innovación. Recuperado: https://www.aec.es/c/document_library/get_file?uuid=d4f00264-ee74-4abd-b1c84e48fccd6836&groupId=10128
- [9] Asociación española de calidad. (2016). UNE 66177. Guía para la integración de sistemas de gestión. Cuadernos de calidad IV.
- [10] Sampieri R. (2014). Metodología de la investigación. Mc-Graw Hill.
- [11] Oviedo H. y Campo A. (2005). Aproximación al uso del coeficiente alfa de Cronbach. Revista colombiana de psiquiatría 34(4), 572-578.
- [12] Nieto R. (2002). Contributions to statistical Analysis. BookSurge Publishing.
- [13] Martínez D. et al. (2022) Metodología para articular el sistema de gestión de calidad NTC-ISO 9001 con la NTC 6503 y la NTSH 006. Tesis de maestría. Universidad Santo Tomas. Colombia.
- [14] Cronbach L. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika 16, 297-334.
- [15] Pedrosa I. et al. (2013). Evidencias sobre la Validez de Contenido: Avances Teóricos y Métodos para su Estimación. Acción Psicológica 10(2).
- [16] López E. (2018). Implementación de la NTS – TS 002 y su integración con criterios de la NTC – ISO 9001:2015. Recuperado: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15900/Art%C3%ADculo%20Especializaci%C3%B3n%20Pachamama%20hostel.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [17] ICONTEC. (2009) Norma Técnica Sectorial Colombiana NTSH 006. Clasificación de establecimientos de hospedaje y alojamiento. Categorización por estrellas de hoteles. Requisitos. Colombia.

Estrategias de prevención en la aparición de enfermedades osteomusculares

Yuleima Esther Conrado Alarcón¹
Cesar Alejandro García Molano²
Fundación Universitaria San Mateo
Colombia

De acuerdo a la prevalencia de desórdenes músculo esqueléticos que afectan la población en general, las empresas manifiestan los sobrecostos al tratar de remediar los problemas en salud de los trabajadores, como molestias, síntomas de origen osteomuscular y malestar, lo que conlleva a enfermedades osteomusculares que determinan incapacidades laborales e indemnizaciones por la pérdida de la capacidad que puede llegar a presentar los trabajadores. ¿Pueden las empresas utilizar estrategias para mitigar aquellas enfermedades osteomusculares? Se realizó un estudio en la empresa Bienestar IPS prestadora de servicios de salud, en el área de call center, encargada de la recepción de llamadas de usuarios. Se realizó un estudio con una muestra de 70 trabajadores, con rango de edad entre 18 y 35 años, para identificar los síntomas músculo esqueléticos que presentan, y las enfermedades que pueden resultar de estos trastornos. De acuerdo a los resultados se pudo determinar que se deben realizar las intervenciones necesarias para ayudar a mitigar los factores de riesgo biomecánicos a los que están expuestos, también es importante considerar las manifestaciones de salud en cada uno de los trabajadores y realizar programas de mejoramiento y acciones preventivas que permitan disminuir el índice de morbilidades en esta área.

¹ Estudiante de Ingeniería en Seguridad y salud en el trabajo.

Contacto: yeconradoa@sanmateo.edu.co

² Licenciado en Química, Especialista en Análisis químico instrumental y Magíster en Métodos de investigación en educación.

Contacto: calejandrogarcia@sanmateo.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los desórdenes músculo esqueléticos representa un porcentaje de las enfermedades profesionales en el ámbito del mundo, debido a la tasa representativa en el sector salud siendo el 50%. Se relacionaron los dolores músculo esqueléticos con las posturas inadecuadas como la torsión del tronco, hombros, elevación de los codos, luz inadecuada y trabajar periodos prolongados en posiciones no confortables, y que poco a poco van causando lesiones en el sistema osteomuscular, según la organización internacional del trabajo, los casos que se reportan hacen que sea la condición de salud que más afecta tanto a los trabajadores como los empleadores.

La prevalencia de los desórdenes músculo esqueléticos de la población en general, se encuentra entre 13.5% y 47% en el ámbito mundial [1]. En 2009, en Estados Unidos se reportó que los desórdenes músculo esqueléticos representaban entre el 29% - 35% de todos los accidentes de trabajo, lo que generó altos costos a nivel país. En Canadá, es la segunda condición de salud más costosa, después de las enfermedades cardiovasculares. En el Reino Unido, el costo anual por desórdenes músculo esqueléticos está estimado en alrededor de 15 billones de libras, en Finlandia, el 28% y en Dinamarca, el 39%, en Colombia represento el 69% de todos los diagnósticos realizados en hombres trabajadores, fueron casos relacionados con enfermedad laboral que estaban asociados con desórdenes músculo esqueléticos [1].

Es importante resaltar que las enfermedades con desórdenes músculo esqueléticos más prevalentes y con morbilidad pueden ser de tipo crónico y agudo. Según el programa de vigilancia epidemiológica osteomuscular las alteraciones osteomusculares son relacionadas en mayor frecuencia en los miembros superiores, entre estos se encuentra el túnel carpiano, la epicondilitis y la tendinitis. En otras regiones del cuerpo aparecen la escoliosis, lumbalgia y cervicalgia [2].

La investigación se realizó en el área de call center de Bienestar IPS de la ciudad de Bogotá, donde los trabajadores una muestra de 70 asesores que se encargan de agendamiento de citas de las distintas sedes de atención, presentan 10 horas de exposición prolongadas en su jornada laboral. El objetivo del proyecto es describir aquellas enfermedades osteomusculares a las cuales han venido siendo expuestos estos trabajadores. El trabajo tiene un alcance descriptivo, el instrumento que se utilizó es el cuestionario nórdico, se usa para determinar aquellos síntomas que se originan a nivel osteomuscular en el trabajador.

El método que consta de 26 ítems específicos acerca de problemas del aparato locomotor y columna lumbar; además, tiene la alternativa que la persona realice el cuestionario de forma autoadministrada dando más detalles de la percepción de los síntomas que presenta, dando un análisis oportuno de estos trastornos, esta herramienta es útil y fácil a la hora de realizar, los datos se analizaron mediante estadística descriptiva, de este modo se pudieron sacar conclusiones y resultados concretos del estudio, por medio de tablas y figuras se pretende dar índices y porcentajes precisos de los estadios que cursan los trastornos osteomusculares.

2. MÉTODO

La presente investigación tiene un alcance descriptivo y de corte transversal, el término descriptivo lo utilizamos para dar características más detalladas acerca de la problemática o realidad que se está presentando, y de esta forma describir las razones o fenómenos que se presentan en el área de trabajo, de este modo se determinan situaciones problemáticas e incidencias que se han presentado en un periodo de tiempo, tener un concepto del estado de salud de los trabajadores y las diferentes sintomatologías osteomusculares que se han desencadenado en su largo trayecto laboral, y por consiguiente tomar las medidas correctivas [3].

Se aplica el cuestionario nórdico como instrumento para identificar los trastornos musculoesqueléticos a los que están expuestos los trabajadores de call center, este instrumento consta de tres secciones, la primera sección donde se completa datos generales contiene 9 ítems, la segunda sección se relaciona con problemas del aparato locomotor de 9 ítems, y la última sección un cuestionario específico que se enfoca con problemas de espalda baja con 8 ítems para un total de 26 ítems todos de carácter dicotómicos (si-no).

por lo que resulta un método sencillo, económico y fácil para recopilar la información de los síntomas que se presentan con mayor frecuencia en los trabajadores de esta área, principalmente los de origen Biomecánico, a través de la recolección de datos, los cuales fueron suministrados por los mismos empleados que realizaron el cuestionario nórdico de forma autoadministrada, datos que fueron organizados y tratados mediante estadística descriptiva [4].

Los 70 empleados participaron con carácter voluntario, dándoles a conocer acerca del instrumento utilizado que es el cuestionario nórdico, las respuestas y datos suministrados serán confidenciales, y tratados solo para estudio investigativo, se les entrega consentimiento informado para que sea debidamente diligenciado a los 70 trabajadores que aceptaron realizar el cuestionario nórdico. La población a trabajar son asesores del área call center de la empresa Bienestar IPS prestadora de servicios de salud, el número de mujeres y hombres participantes se representa en la Tabla 1.

Tabla 1. Trabajadores de la muestra

Género	n	%
Mujeres	45	64,0
Hombres	25	35,0
Total	70	

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El tratamiento de datos se realizó mediante estadística descriptiva, en el cual se calculó la frecuencia absoluta. A través del cuestionario nórdico se identificó los problemas que tienen más incidencia en los trabajadores del call center durante los últimos 12 meses en su aparato locomotor como lo es molestias, malestar y dolor, los datos se muestran en la Tabla 2, que contiene los resultados estadísticos. Los valores estadísticos que se representan en frecuencia absoluta (n) y frecuencia porcentual (%) [5].

Tabla 2. Trastornos del aparato locomotor

Área corporal	n	%
Cuello	37	53,0
Hombro	33	47,1
codo	14	20,0
Muñeca	38	54,2
Espalda alta	34	48,57
Espalda baja	44	62,8
Una o ambas caderas/piernas	20	28,57
Una o ambas rodillas	24	34,2
Tobillos y pies	14	20,0
Total	70	

Se evidencia en la muestra que los trabajadores presentan mayor incidencia de sintomatología osteomuscular, en la espalda baja con un resultado de 62%, seguida de esta el malestar en la muñeca que representa 54,2% siendo las principales áreas del cuerpo que han sufrido desordenes musculoesqueléticos en los trabajadores.

Las otras áreas del cuerpo también presentan sintomatología osteomuscular en el cuello con 53,0%, la afectación de la espalda alta con 48,57% el hombro con 47,1%, las rodillas con 34,2% y en menor proporción se encuentra el codo y rodillas y pies con un 20% de incidencia en el total de 70 encuestados, como se representa en la Figura 1.

La participación de los trabajadores del área fue en un 100% todos respondieron a los 9 ítems de los problemas relacionados con el aparato locomotor.

De acuerdo con los resultados, se evidencia que el cuello es el área del cuerpo con más incidencia de dolor y molestias con 53% en la población trabajadora en ambos estudios, seguidamente las molestias en las muñecas representan 54% de frecuencia de síntomas manifestados en esta área.

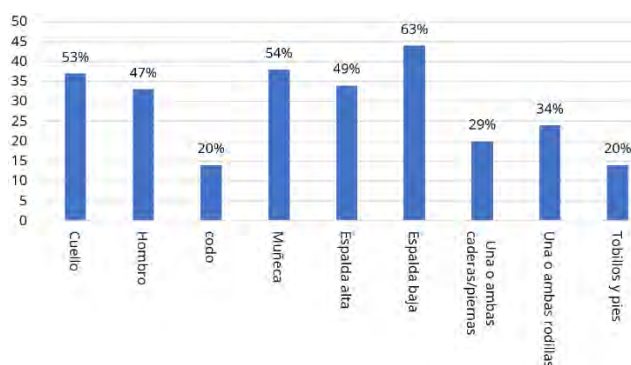


Figura 1. En algún momento durante los últimos 12 meses ha tenido problemas de dolor o molestias

El cuestionario nórdico nos permite identificar problemas y trastornos musculoesqueléticos, da el detalle de la severidad de los síntomas que presenta en la columna lumbar baja (espalda baja) debido a las molestias. En las siguientes Tablas y Figuras se presentan los resultados obtenidos de los encuestados y se hace un análisis de las frecuencias.

Tabla 3. Problemas en espalda baja

	n	%
Hospitalizado por problemas en espalda baja	6	8,5
Cambio de trabajo por problemas de espalda baja	8	11,4

El cuestionario indica que el 8,5% (n=6) de los trabajadores ha estado hospitalizado a causa de problemas en la espalda baja (Figura 2).

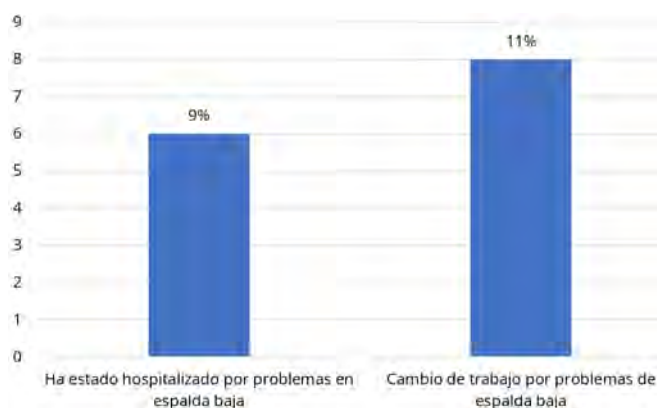


Figura 2. Problemas en la espalda baja

Tabla 4. Tiempo con problemas de espalda baja en los últimos 12 meses

Días	n	%
1-7	25	35,7
8-30	14	20,0
>30	6	8,5
Todos los días	2	2,8

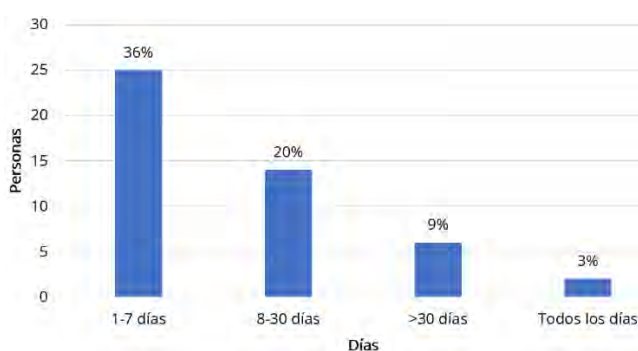


Figura 3. Tiempo con problemas en la espalda baja

Como se observa en la Figura 3 el mayor reporte de problemas de espalda baja que afecta considerablemente la salud de los trabajadores en el rango de 1 a 7 días ha sido de 35,7% (n=25) de los encuestados, en segundo lugar, el 20,0% (n=14) de 8 a 30 días, en tercer lugar, los trabajadores que sufren de los síntomas may006Fr a 30 días representa el 8,5% (n=6), y en menor proporción de 2,8% (n=2) de los encuestados que han manifestado estos problemas todos los días.

La Tabla 5 y la Figura 4 reportan que los trabajadores que han tenido que reducir sus actividades laborales a causa de esta manifestaciones clínicas ha sido de 15,7% (n=11) de los encuestados, en cuanto a los que han tenido que cambiar sus actividades de ocio a causa de los síntomas es 17,1% (n=12) seguidamente representando a aquellos trabajadores que han tenido que ser atendidos por un médico o especialidades de salud ocupacional es 5,7% (n=4) de los encuestados, y por último los trabajadores que han sufrido problemas de espalda baja en los últimos 7 días es 27,1% (n=19) siendo la mayor manifestación adversa de problemas de espalda baja durante los últimos 12 meses.

Tabla 5. Manifestaciones adversas de haber tenido problemas en la espalda baja durante los últimos 12 meses

	n	%
Actividad laboral	11	15,7
Actividad de ocio	12	17,1
Ha sido atendido por un medico	4	5,7
Problemas de espalda baja en los últimos 7 días	19	27,1

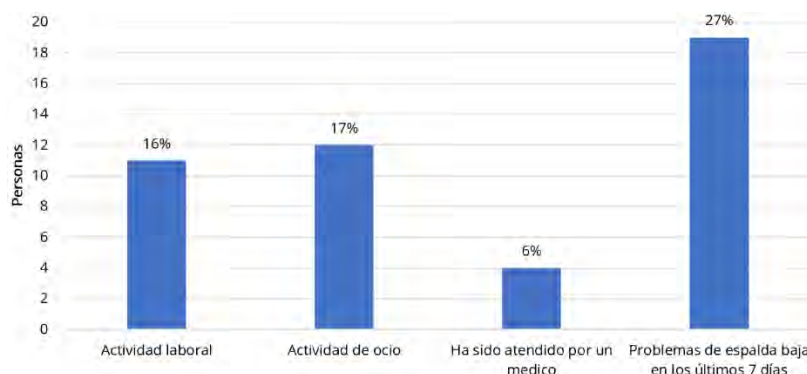


Figura 4. Manifestaciones adversas

Los trastornos musculoesqueléticos que han adquirido los trabajadores en los últimos 12 meses les han impedido ejercer sus actividades laborales de forma regular, la Tabla 6 y a Figura 5 representan en primer nivel ese tiempo total que han tenido que sufrir problemas de espalda baja en rango de 1 a 7 días el 28,5% (n=20) de los encuestados, en segundo lugar el 4,28% (n=3) entre 8 a 30 días tienen impedimento, y en tercer lugar en menor proporción el tiempo total es mayor a 30 días de 1,42% (n=1) de los encuestados.

Tabla 6. Los problemas de espalda baja le han impedido hacer su trabajo normal durante los últimos 12 meses

	n	%
1-7 días	20	28,5
8-30 días	3	4,28
>30 días	1	1,42

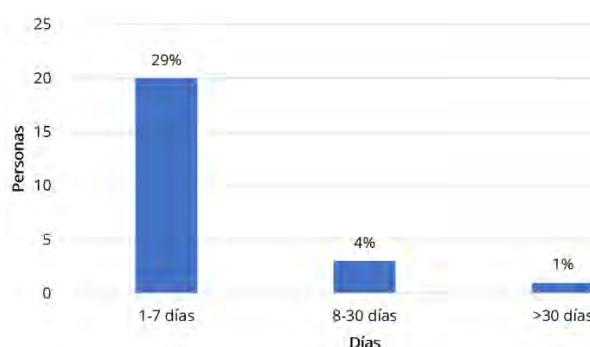


Figura 5. Los problemas de espalda baja le han impedido hacer su trabajo normal

De acuerdo a los resultados registrados, se puede determinar unas estrategias preventivas, para que mitigue las posibles causales que están afectando las actividades asignadas a los trabajadores de call center y que dan lugar a los trastornos musculoesqueléticos.

3.1 Estrategias preventivas

- Realizar programación en la jornada laboral cuando se van a realizar las actividades de salud física y mental.
- Que la empresa se haga partícipe para la realización de las distintas jornadas en materia de salud ocupacional.
- Campañas de estilos saludables, disminución de estrés.
- Evaluación periódica ocupacional si el trabajador presenta algún síntoma relacionado a desórdenes musculoesqueléticos y este lo manifiesta, solicitar exámenes para que médico-laboral emita un diagnóstico, y recomendaciones necesarias para la salud del trabajador.
- Seguimiento de las recomendaciones si el trabajador presenta alguna enfermedad laboral y tiene alguna recomendación por parte del médico laboral, tener un seguimiento del estado de salud del trabajador.

Conviene subrayar los objetivos específicos que se han abordado en contexto con la investigación, indicando todos aquellos síntomas osteomusculares que han afectado las actividades rutinarias en los trabajadores, así mismo identificando los problemas locomotores de forma céfalo caudal en la aplicación de los cuestionarios específicos señalados en el cuestionario nórdico; y en concreto brindar las estrategias y recomendaciones para la prevención de los trastornos musculoesqueléticos que presentan los trabajadores del área.

4. CONCLUSIONES

El proceso de estudio que se realizó a los trabajadores del área de call center por medio del instrumento cuestionario nórdico, esta herramienta nos permite describir los desórdenes musculoesqueléticos que se desarrollan en trabajadores expuestos a riesgos biomecánicos, esta herramienta fue muy útil a la hora de aplicarla en el área de call center.

Se logró determinar la afectación asociada a síntomas osteomusculares que comprometen a nivel anatómico empezando desde el cuello, hombro, muñecas y las molestias que representan a los trabajadores el tiempo de exposición, lo que probablemente puede conllevar a incapacidades laborales.

Para los trabajadores del área de call center las áreas con mayor molestias y dolor que se evidenciaron en el cuestionario fueron la espalda baja con 62,8% seguida de la muñeca con 54,2% pueden ser el principio de morbilidades laborales adquiridas en este puesto de trabajo, las áreas con menores molestias musculoesqueléticas fueron el codo tobillos y pies con un 20% de incidencia.

Lo anteriormente descrito nos permite plantear y realizar las intervenciones necesarias para ayudar a mitigar aquellos factores de riesgo biomecánicos a los que están expuestos los trabajadores, es importante considerar aquellas manifestaciones de salud en cada uno de los trabajadores y realizar programas de mejoramiento y acciones preventivas que permitan disminuir este índice de morbilidades en esta área de trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Sánchez A. (2018). Prevalencia de desórdenes músculo esqueléticos en trabajadores de una empresa de comercio de productos farmacéuticos. Recuperado: <http://www.scielo.org.co/pdf/recis/v16n2/1692-7273-recis-16-02-203.pdf>
- [2] UNGRD. (2014). Programa de vigilancia epidemiológica osteomuscular. Recuperado: http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Lineamientos_Int/PRO-1601-GTH-04_PROGRAMA_DE_VIGILANCIA_EPIDEMIOLOGICA_OSTEMUSCULAR.pdf

- [3] Calduch R. (2014). Metodos y tecnicas de investigacion. Recuperado: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/835-2018-03-01-Metodos%20y%20Tecnicas%20de%20Investigacion%20Internacional%20v2.pdf>
- [4] Ministerio de Salud de Chile. (2020). Cuestionario nórdico estandarizado de percepción de síntomas músculo esqueléticos. Recuperado: <https://www.ispch.cl/sites/default/files/NTPercepcionSintomasME01-03062020A.pdf>
- [5] Rodriguez D. (2017). Percepción de desórdenes musculoesqueléticos y aplicación del método RULA en diferentes sectores productivos. Recuperado: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-08072017000100057&script=sci_abstract&tlng=es

Cómo incorporan las nuevas tecnologías las organizaciones sociales y solidarias para mejorar sus servicios

Juan Santiago Calle Piedrahita¹
Sandra Milena Malavera Pineda²
Julián David Colorado Agudelo³
Universidad Católica Luis Amigó
Colombia

En Colombia la mayoría de las empresas se centran en incorporar nuevas tecnologías para el desarrollo de su objeto social con eficiencia, sin embargo, se investigan en sociedades comerciales y no en el sector social y solidario. Por ende, es conveniente encontrar respuesta a la pregunta: ¿cómo incorporan la tecnología las organizaciones sociales y solidarias para ofrecer mejores servicios a su público objetivo? La metodología aplicada fue una investigación cuantitativa con cuestionario semiestructurado enviado a los gerentes del sector social y solidario de Colombia, según base de datos de la Superintendencia de la Economía Solidaria. Se envió a 1324 gerentes, de los cuales 89 contestaron la encuesta vía correo electrónico durante el primer semestre de 2022. En los hallazgos se destaca que confunden los términos de innovación y tecnología; además, consideran como tecnologías el uso de la nube, creación de páginas web y creación de una base de datos tipo CRM. La principal conclusión es que las organizaciones de economía social y solidaria en Colombia incorporan poca tecnología para enfrentar la cuarta revolución industrial con errores de implementación.

¹ Administrador de Negocios, Especialista en Mercadeo, Magíster en Administración y Doctor en Ingeniería.

Contacto: juan.callepi@amigo.edu.co

² Ingeniera de Sistemas, Especialista en Alta gerencia y Magíster en Direccionamiento de marketing.

Contacto: Sandra.malaverapi@amigo.edu.co

³ Magíster en salud pública.

Contacto: julian.coloradoag@amigo.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En el transcurso de la historia, se han presentado diferentes sucesos que han permitido ver cómo la evolución de la industria afecta a la sociedad. En la mitad del siglo XVIII se inventó la máquina de vapor la cual produjo un cambio significativo a nivel social, económico y tecnológico, lo cual fue conocido como la primera Revolución Industrial [1]. Luego debido al rápido avance de la producción que produjo esta revolución, se buscó maneras de producir más rápido y con mejor calidad [2]. Con este contexto se produjo la división de tareas, y tiempo después, se creó el Modelo T de Ford [3] con el cual se estableció el segundo hito a resaltar en la historia de la industria.

De acuerdo con lo anterior, se logró conseguir la producción en masa la cual fue introducida por Henry Ford, lo que provocó un cambio profundo en la sociedad, debido a que productos principalmente reservados a un grupo reducido de personas privilegiadas fueran accesibles a todo el mundo [4]. Esto fue considerado como la segunda revolución industrial. Luego, la invención del internet es lo que ocasionó la tercera revolución industrial la cual contribuyó en el desarrollo de todas las tecnologías de información y comunicación TIC [5], y permitió que se diera el fenómeno de la globalización [6] y este a su vez ayuda a comenzar a automatizar procesos [7]. Esta última revolución es que la que da comienzo a la evolución del uso de la tecnología en el que surge un concepto denominado industria 4.0, el cual inició la denominada cuarta revolución industrial [8]. Esta nace como una estrategia para el desarrollo de las tecnologías, impulsado por el gobierno alemán que buscaba potenciar el crecimiento industrial en búsqueda de reposicionar a Alemania como pionera en desarrollo industrial y tecnológico [9].

La cuarta Revolución Industrial inicia la economía digital, la cual se puede establecer en la primera década del siglo XXI [10], a partir de las nuevas capacidades de Internet como su red física e inalámbrica que permiten el despliegue de nuevas tecnologías emergentes: Cloud Computing, Big Data, Internet de todas las Cosas IoT, Smart Cities o Industria 4.0 para transformar digitalmente las empresas. La transformación digital recibe su denominación por el cambio que las tecnologías emergentes van a producir en la naturaleza de productos y servicios.

De acuerdo con lo anterior, la cuarta revolución industrial contribuye a la tendencia de la automatización total de la manufactura, para conseguir su producción a una independencia amplia de la mano de obra humana. En otras palabras, hay iniciativas en el mundo que se preparan para automatizar los sistemas tradicionales, y esto se puede observar desde cosas pequeñas de la vida cotidiana hasta grandes y complejos procesos industriales. Por lo tanto, la globalización y la transformación digital provocan que la economía y las empresas deban reformular sus modelos de negocio y analizar a la competencia [11-15].

La transformación digital es identificada por el cambio que las tecnologías emergentes que producen en el desarrollo de productos y servicios [16]. Se fundamenta en la combinación de productos físicos y servicios virtuales, con cosas y personas de forma inteligente, que transforma la naturaleza de los productos y los servicios [17]. Este cambio posibilita la transformación digital de las organizaciones tradicionales de servicios e industrias en los sectores de la economía [18].

La transformación digital por la que se puede combinar y conectar productos, cosas y personas colabora con la posibilidad de innovación a una escala no imaginada en revoluciones anteriores. A la vez las tecnologías facilitan la manera de trabajar en redes abiertas o colaborativas con procesos de innovación abierta y ecosistemas creativos que permite a los colaboradores de las empresas [19], organizaciones de innovación [20] y la participación de personas externas a la empresa a desarrollar propuestas que transforman a la sociedad y contribuyen al crecimiento económico del país.

La incorporación de las tecnologías emergentes en las empresas ocasiona cambios en sus subsistemas [21]; en las estructuras organizativas [22], las formas de trabajo [23], el desarrollo de nuevos productos y servicios para mercados globales [19] y nuevos clientes que cada vez están más informados [24]. Por esta razón, es necesario identificar los cambios en las competencias que son necesarias para trabajar en la era digital [25, 26].

La economía social y solidaria adaptan el cooperativismo al desarrollo económico y social [27]. Por ende, las cooperativas enfrentan un nuevo reto desde la aplicación de la cuarta revolución industrial al involucrar sistemas inteligentes; es decir incorporar tecnología en sistemas de redes, pero se tiene el miedo de realizar redes porque consideran que se robaran los clientes [28]. A su vez, en las organizaciones de economía social y solidarias genera un aumento positivo al interpretar las condiciones de género en el desarrollo de proyectos sociales que impactan la sociedad y el ambiente natural [29]. Pero las organizaciones híbridas equilibran la tensión entre lo social y lo económico, pero en ocasiones delimitan la gestión a lo social excluyendo lo ambiental [30].

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Estructuras de organizaciones de economía social y solidaria en Colombia

La Ley 79 del 23 de diciembre de 1988 define en el Artículo 4: Es cooperativa la empresa asociativa sin ánimo de lucro, en la cual los trabajadores o los usuarios, según el caso, son simultáneamente los aportantes y los gestores de la empresa, creada con el objeto de producir o distribuir conjunta y eficientemente bienes o servicios para satisfacer las necesidades de sus asociados y de la comunidad en general [31]. La ley 454 de 1998 de la República de Colombia expresa que:

por la cual se determina el marco conceptual que regula la economía solidaria, se transforma el Departamento Administrativo Nacional de Cooperativas en el Departamento Administrativo Nacional de la Economía Solidaria, se crea la Superintendencia de la Economía Solidaria, se crea el Fondo de Garantías para las Cooperativas Financieras y de Ahorro y Crédito, se dictan normas sobre la actividad financiera de las entidades de naturaleza cooperativo [32].

En síntesis, las cooperativas son entes que aportan a la construcción de un ambiente solidario para beneficiar a la comunidad sin ánimo de lucro. Los fondos de empleados se rigen por el decreto 1481 del 17 de julio de 1989 por el cual se determinan la naturaleza, características, constitución, regímenes internos de responsabilidad y sanciones, y se dictan medidas para el fomento de los fondos de empleados [33]. A su vez, se debe analizar que las organizaciones mutuales como entidades de economía social solidaria. Esta se define bajo el Ley 2143 de 2021 con el artículo 1. Objeto. El objeto de la presente Leyes es dotar a las asociaciones mutualistas de un marco jurídico adecuado que garantice su identidad, su autonomía, su vinculación activa a la economía del país, y el reconocimiento por parte del Estado como modalidades empresariales solidarias con fines de mejoramiento social [34]. E

n este mismo grupo de clasificación de organizaciones de economía social y solidaria están las asociaciones y las precooperativas. Las asociaciones se rigen por la Ley 454 de 1998, Ley 79 de 1988, Decreto 1481 de 1989 y el Decreto 1480 de 1989; es decir, es un ente jurídico sin ánimo de lucro que nace de la voluntad de varios asociados, los cuales pueden ser personas naturales o jurídicas (privadas o públicas) y que tiene como finalidad ofrecer bienestar físico, intelectual o moral, a sus asociados o a la comunidad en general [35]. Ahora bien, la segunda organización son las precooperativas. Estas se rigen por la Ley 79 de 1988, la cual las define como una entidad que, con la ayuda de otra ya existente, que la orienta y promueve, realiza las actividades de las cooperativas, pero que por tener limitaciones de carácter económico, educativo, administrativo o técnico no está en posibilidad de constituirse inicialmente como una cooperativa" [35].

En Colombia las organizaciones de economías social y solidaria se dividen en mutuales, cooperativas, asociaciones, precooperativas y fondos de empleados, los cuales se centra en apoyar el cooperativismo social.

3. MÉTODO

La investigación se realizó durante el primer semestre del 2022 con un cuestionario semiestructurado enviado a gerentes del sector de economía social solidario de Colombia. Se realizaron 15 preguntas las cuales de depuraron por las observaciones dadas por seis profesores del área de conocimiento. A su vez, se identificaron preguntas faltantes en relación con el tema de tecnologías. Se tomaron los datos de la primera encuesta como parte del estudio. Los correos electrónicos fueron otorgados por la lista pública que

posee la Superintendencia de economía solidaria con sede en Bogotá. Contestaron la encuesta 89 directivos de las organizaciones del sector económico social y solidario de Colombia. A su vez, se definieron por el tipo de sociedad civil (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de sociedad de economía social y solidaria

Tipo de Sociedad	Cantidad
Cooperativa	57
Fondo de Empleados	24
Mutual	5
Asociación	2
Precooperativa	1
Total	89

El 64,04% son de cooperativas y el 26,96% son organizaciones de fondo de empleados. En la Tabla 2 se exponen el tipo de directivos a quienes se les aplicó la encuesta.

Tabla 2. Tipo de directivo

Directivo	Cantidad
Gerente	77
Representante Legal	5
Contador	2
Administrador	1
Analista de comunicaciones y mercadeo	1
Asistente administrativo	1
Auxiliar de mercadeo	1
Director de SF y logística	1
Profesional Especializado	1
Total	89

El 86,51% de los encuestados tiene en el cargo de gerente, el 5,61% son representantes legales; sin embargo, aparecen cargos administrativos con enfoque auxiliares o asistentes. Las encuestas se aplicaron a nivel nacional de las cuales el 77% pertenecen al departamento de Antioquia y de ello el 55% son de la ciudad de Medellín (Tabla 3).

Tabla 3. Municipios participantes

Municipio	Cantidad
Medellín	49
Bogotá	5
Granada	4
Abejorral	2
Amalfi	2
Antioquia	2
Belmira	2
Envigado	2
Guatapé	2
Maceo	2
Salgar	2
San Roque	2
Santuario	2
Andes	1
Bucaramanga	1
Copacabana	1
Girardota	1
Itagüí	1
Marinilla	1
Rionegro	1
Sabaneta	1
Santa Rosa De Osos	1
Yalí	1
Yarumal	1
Total	89

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Tecnologías y cuarta revolución

Las organizaciones de economía social y solidaria en Colombia consideran la tecnología como parte de la innovación. Así mismo, el 67,41% considera la Big data como elemento diferenciador para mejorar la interacción con los clientes. El 13,48 % considera la nube como tecnología para estructurar un factor diferenciador al tener mayor espacio de almacenamiento, archivos compartidos, análisis de documentos archivados y tener espacios seguros de la información de los procesos de la organización. Sin embargo, el 10,11 % considera la incorporación de Big data y Nube, al mismo tiempo, como un elemento para destacarse en el medio de la cuarta revolución industrial.

Es decir, comenzar a utilizar la información de la Big data en la incorporación de inteligencia artificial; por ende, se gestiona gran volumen de datos, tanto estructurados como no estructurados, para la adecuada toma de decisiones. Es así, que las organizaciones promueven analizar muchos datos que las empresas poseen pero que no sabían cómo utilizarlas. Además, las cooperativas al invertir en Big data permiten recopilar grandes cantidades de datos y analizar las tendencias de forma que solucione problemas de manera eficiente (Tabla 4). Por ejemplo: identificar las características de los clientes para identificar que nuevos portafolios personalizados se les puede ofrecer. Asimismo, permite la reducción de los costos al analizar los datos de forma unificada y coherente con los sucesos del interés del consumidor.

Tabla 4. Uso de nuevas tecnologías en cooperativas

Nuevas tecnologías	Tipo de Sociedad				
	Cooperativa	Fondo de Empleados	Mutual	Total	
Tecnología					
Big data	4	2		6	
Big data, Internet de las cosas, Nube (Cloud Computing)	1			1	
Big data, Nube (Cloud Computing)	9			9	
Nube (Cloud Computing)	6	6		12	
Nube (Cloud Computing), Simuladores			1	1	
Nube (Cloud Computing), Sistemas Integrados, Ciberseguridad			1	1	
Sistemas Integrados	1		1	2	
Sistemas Integrados, Ciberseguridad			1	1	
(en blanco)					
	Total	21	11	1	33

Se detectó que las asociaciones y precooperativas no tiene un vínculo de aplicar tecnología; sin embargo, las cooperativas y fondo de empleados considera la tecnología al tener Cloud computing como herramienta para analizar los efectos de las costumbres de consumidor y usuario; a su vez, estas consideran el Big data como soporte a la vinculación con la tecnología; desde otro punto de vista, las cooperativas y las mutuales consideran importante implementar la tecnología en relación con sistemas integrados y la ciberseguridad.

Al incorporar la ciberseguridad en el sistema de información de las cooperativas, les permite protección de datos de las diversas amenazas internas y externas al detectar el programa maligno o *ransomware* o secuestro de información. Además, la forma de prevenir los ataques externos se basa en actualizar el software constantemente, establecer filtros de spam, utilizar contraseñas diferentes en cada dispositivo y mantener una copia remota sin conexión a internet.

Asimismo, el control de la prevención de ciberataques desde la misma entidad logra generar privacidad de información que está en custodia de la entidad y en espera de seguridad inconsciente por parte de los clientes.

La incorporación de tecnologías de la cuarta revolución en las organizaciones de economía social y solidaria en Colombia permite establecer nuevas oportunidades. Primero, sustituir personal con máquinas, pero las máquinas son apoyo de nuevas formas de gerenciar el ser humano en la organización. A su vez, se incorporan sensores que lanzan datos seguidos pero que el hombre no alcanza a analizar; es por el miedo de cambiar el pensar humano por un proceso de analíticas; pero es una oportunidad de aprender a tomar

decisiones con mayor certeza y menor riesgo. Las organizaciones incorporan robots para atender a los clientes; es, por ende, el miedo de la sustitución del hombre en la organización, pero la realidad es una estructura que complementa el ejecutar las tareas repetitivas de manera de aumentar la eficiencia.

El Big data facilita almacenar muchos datos en espacios pequeños, pero con un alto valor de análisis para una adecuada toma de decisiones. A su vez, aporta el mejoramiento al tener datos actualizados del comportamiento de consumidor. Los datos son muchos, pero una gráfica permite analizar de una manera rápida los datos e identificar las condiciones que requiere el cliente con una oferta que cubra las necesidad y deseos. Ahora, las organizaciones están adoptando enseñanzas para aprender a convivir con la tecnología para aprender a aumentar la eficiencia.

La Figura 1 aporta a aprender el manejo de la investigación y desarrollo en forma colaborativa; es decir, aprender a gerenciar los datos de forma ágil al tener un buen banco de datos en el Bigdata. Es decir, se debe actuar antes que la competencia al incorporar nuevas tecnologías. Las cooperativas comienzan con la capacitación a los empleados para aceptar máquinas que analizan información en segundos y logra eficiencia de la toma de decisiones, pero el ser humano aprender a desaprender para asimilar que el bigdata es una herramienta y no una sustitución de la mano de obra.

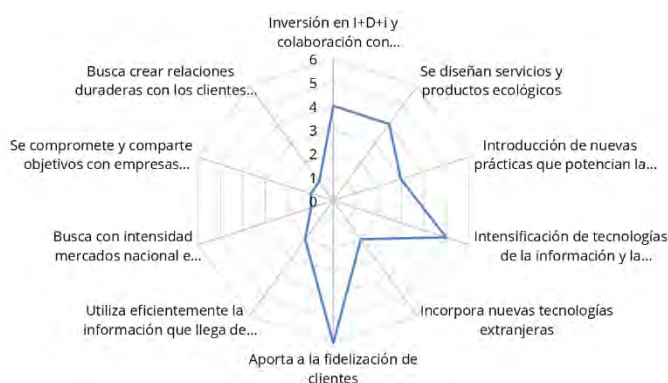


Figura 1. Impacto de uso de tecnología en las organizaciones de economías social y solidaria

Las organizaciones de economía social y solidaria comienzan a entender la necesidad de utilizar la tecnología para incrementar en los procesos de eficiencia. Por ende, la fidelización de los clientes se mejor al tener una buena cantidad de datos que alimentan la minería de datos y poder identificar las características de los clientes. A su vez, las cooperativas invierten en tecnología en Big data, internet de las cosas, nube, y sistemas integrados. Es decir, se genera una conciencia social al utilizar la tecnología como herramienta para analizar datos que apalanquen la gestión de forma anticipada para la adecuada toma de decisiones.

Los fondos de empleados invierten en nuevas tecnologías en un 12,35 % enfocadas en Big data, nube y ciberseguridad. La combinación de utilizar el Big data y la nube configura una oportunidad de efectuar seguimiento a los clientes de formas sistémica al tener los datos en forma ordenada desde las mismas variables. La información viene de muchos medios, por ejemplo: la contabilidad, datos de los proveedores, fechas, créditos, analíticas de los sitios de web, cada cuanto compran, etc. Por ende, muchos datos que llegan de diferentes fuentes son difíciles de gestionar; es decir, los datos complejos conllevan a que las organizaciones no detectan que tipo de dato se guardó para convertirla en información (datos no estructurados). Es decir, está perdiendo eficiencia por no analizar los datos en su conjunto sino una parte de estos. Las nubes y el Big data aportan a organizar los datos y convertirlos en información con detalles que tienen patrones que aportan para la toma de decisiones.

El Big data en un almacenamiento de alto volumen de datos de diferentes fuentes con diferentes estructuras con una alta velocidad de cambio; lo que conlleva a procesar viabilidad (datos diferentes) en corto plazo; además, permite analizar la velocidad de nuevos datos en un tiempo definido; a su vez, generar valor, es decir, identificar si los datos obtenidos generan información que nos sirve para la toma de decisiones. Los nuevos datos son transformados para generar valor o riqueza. Es decir, lograr identificar

patrones desde un modelo predeterminado para analizar la coherencia de los datos y mejorar la actividad de mostrar las tendencias de las ventas, datos de comportamiento, analizar clientes de alto consumo o soluciones de tráfico de información del usuario en las organizaciones.

Las organizaciones mutuales se centran en incorporar sistemas integrados; es decir, ayudan a las organizaciones a mejorar la calidad de los productos y servicios ofertados. Al incorporar sistemas integrados facilita el proceso de evaluación, permite unificar metodologías de comunicación coherentes, unifica metodología de control, configurara programas comunes y reducir tiempos de auditorías. Desde el mismo punto de vista, las mutuales requieren centralizar la gestión de la información para la toma de decisiones.

Las nuevas tecnologías aplicadas en las organizaciones de economía social y solidaria son de carácter obligatoria para enfrentar la globalización; es decir, las cooperativas deben tener una visión amplia y no centrarse en situaciones específicas del país. La globalización aporta a las organizaciones para mejorar la comunicación [36], agilizar todos los procesos para el intercambio cultural [37], rompimiento de fronteras comerciales para la oferta de nuevos servicios y productos sociales colaborativos [15]. Además, con los avances tecnológicos apalanca la aplicación de una filosofía de derechos humanos que ayuda a tener una comprensión social. En otras palabras, la sociedad requiere se seres sociales que conlleven a la cuarta revolución industria por la automatización de la información para aprender a ser sociales.

Las precooperativas se identifican en lograr una relación con los clientes al identificar las necesidades de los clientes por tener mayor rapidez en proporcionar resultados visibles y un mayor grado en el que afecta a los usuarios al no ser atendidos. A su vez, aporta a mejorar la conectividad directamente con las características de los asociados para incrementar su satisfacción social, económica y ambiental plenamente. La tecnología del Big data de las cooperativas se centran en otorgar beneficios financieros (ahorro y créditos con fácil acceso); beneficios educativos (auxilios o becas para lograr metas profesionales), beneficios recreativos (salidas de integración y celebración de fechas especiales) y seguros (alianzas para la protección social). Desde otro punto de vista, las mutuales se enfocan en proteger al trabajador con programas preventivos de capacitaciones.

Las nuevas tecnologías extranjeras son valoradas bajas en las cooperativas por la no inversión oportuna por el miedo de baja rentabilidad; es decir, lo económico está por encima de la actividad sociales. Las mutuales se centran en dirigir los sistemas de información para aumentar la satisfacción de necesidades de los asociados, mediante asistencia médica, farmacéutica, funeraria, subsidios, ahorro y crédito y actividades culturales, educativas, deportivas o turísticas. A su vez, las mutuales aportaron a mejorarla calidad de los asociados al tener una visión conjunta para impactar la comunidad con un enfoque social. Una visión que apalanca la integración de servicios financieros [18] pero con un enfoque social.

La economía social promueve el desarrollo desde el aporte de ideas para solucionar problemas del sector desde un enfoque social. Las mutuales se centran en luchar con un espíritu por la percepción de las desigualdades de la humanidad. Es decir, la solidaridad de las institucionales es la base para apoyar a los más necesitados. Las cuotas de los asociados ayudan a desarrollar el objetivo social en la comunidad desde las diversas actividades.

Las organizaciones se estructuran fuertemente en la fidelización de los clientes. Por ende, las tecnologías aportan a identificar las necesidades de ellos y así lograr una mayor satisfacción. Sin embargo, hay poco uso de la tecnología en las cooperativas por la operación tradicional de contacto físico con los asociados, lo que conlleva a un incremento de los costos. Con la tecnología hay cierto anonimato de atención de los clientes. A su vez, promueven las herramientas para tener un contacto directo con los clientes en tiempo real, pero no se invierte en la creación de App de organizaciones sociales por conservar la visión social y evitar el aumento de los aportes sociales. La utilización eficientemente de la información recolectada por las organizaciones tiene una valoración de 40% ya que son muchos datos al mismo tiempo y no se tiene la capacitada de análisis. Es decir, los datos son recolectados, pero no se sabe qué hacer con ellos o toman parcialmente los datos que requieren en ese momento para atender al usuario. Además, no se involucra la alta gerencia para la modernización tecnológica [38].

Los datos obtenidos son flexibles y cambiantes y las cooperativas no tiene los sistemas de información para analizarlos en tiempos reales. Por ende, los datos son asilados dentro de los diferentes departamentos de la organización y no hay un cruce adecuado para proporcionar estrategias dirigidas a cada cliente. La firma digital la consideran las organizaciones como nueva tecnología, pero solo se otorga para la identificación del individuo y no para prestarle los servicios ofertados por la organización. El 61,79 % de los asociados recibieron capacitación tecnológica; sin embargo, desconocen su aplicación en el contexto de la organización (Figura 2).

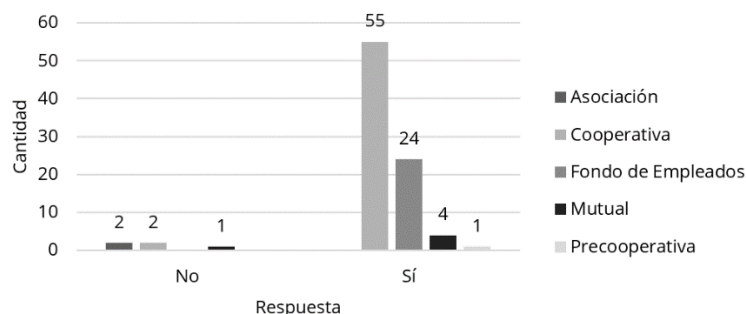


Figura 2. Capacitación en tecnología por organización

Las nubes son herramientas que reducen los costos, pero las cooperativas desconocen el uso de ellos por el imaginario de la inseguridad que estas tienen. Además, las cooperativas tienen el miedo de compartir datos con otras organizaciones por considerarlas competencias olvidando el enfoque social. El uso de las nubes está en crecimiento, pero las organizaciones la consideran como una moda y no como un elemento diferenciador para generar valor hacia futuro. También, las organizaciones tienen una miopía en el diseño deservicios ecológicos por considerar que es un recurso inagotable, por ende, la administración de la nube se considera como un mecanismo que ayuda a la reducción de efectos ambientales; pero al mismo tiempo se requieren de nuevos servidores conectados al uso de energías no limpias para mantener activa los datos. En otras palabras, se daña la naturaleza con el uso de energía, pero a su vez se mira como un ahorro de papel.

La tecnología en las cooperativas es de baja inversión por que no se considera oportuna para su actualización y analizan el alto riesgo financiero. Además, consideran que la información está en adecuadas condiciones de acceso, pero no analizan los ataques cibernéticos que podrían robar esos datos y afectar el normal funcionamiento de la organización. También, hay baja interacción con los clientes, puesto se considera que ellos son quienes deben asistir a la cooperativa y no a la inversa. En la Figura 3 se denota que el 79,65 % no tienen dificultades al implementar tecnología en la organización después de recibieron capacitaciones sobre el tema.

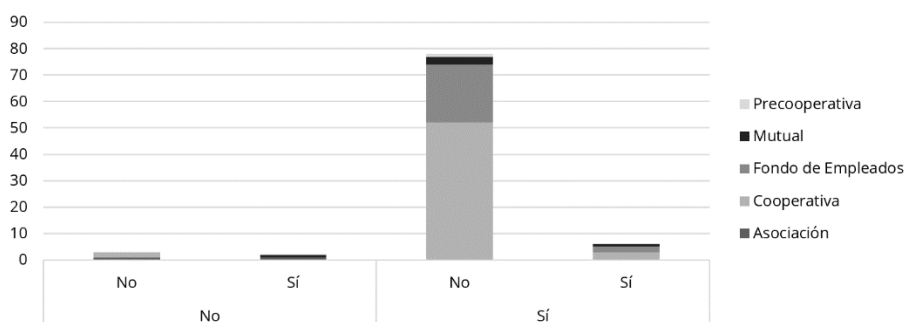


Figura 3. Capacitación en tecnología y dificultad de implementación por organización

Las organizaciones de economía social y solidaria manifiestan no tener problemas al momento de implementar tecnologías. Sin embargo, pocas organizaciones expresaron que tienen problemas al implementar tecnología por las siguientes razones: falta de compromiso de la gerencia, inversiones altas, falta de incentivos a los asociados, déficit en la relación costo/beneficio. Además, la mayoría recibe capacitaciones en tecnología, pero se quede en aspectos teóricos y epistemológicos; es decir, no se aplican la teoría en los diversos contextos de la organización.

La tecnología aporta a la economía digital al involucrar al personal interno y externo de las cooperativas siempre y cuando las ideas de ellos son estudiadas y definidas como oportunidades de mejora en la organización, lo cual apoya el concepto de definir con claridad las capacidades de las cooperativas [10]. Así mismo, se debe estudiar la competencia para aprender de sus mejores prácticas tecnológicas [39]. La investigación detectó que las organizaciones de economía social y solidaria aplican poca investigación de mercados, porque consideran que sus clientes (asociados) divulgan la claridad de esta; sin embargo, la oferta de nuevos productos y servicios se debe a la percepción favorable de los usuarios y de la comunicación inteligente hacia un determinado nicho de mercado.

Es decir, los servicios virtuales se gestionan de diferente forma a la gestión de un servicio comercial tangible y tradicional [16]. Además, las organizaciones deben enfocarse en comprender los entornos externos que pueden afectar la gestión tecnológica de esta; es decir, realizar estudios de viabilidad al implementar los servicios tecnológicos [20]. Para este caso, las cooperativas capacitan a su personal desde una visión interna (89,54 %) y no desde los requerimientos externos de los clientes y del entorno. Desde otro enfoque, las mutuales (1,12 %) tiene problemas de inversión en tecnología por la falta de acceso a internet, formación de los usuarios y demoras por parte del proveedor tecnológico. Desde otro punto de vista, las cooperativas fallan al implementar nuevas tecnologías por falta de formación de los usuarios; es decir, capacitar a los clientes externos.

El enfoque de las cooperativas ayuda al desarrollo social y económico de la comunidad; pero para lograrlo debe estudiar el entorno y definir mecanismo para su implementación [29]. Por ejemplo: las personas de mayor edad no identifican el uso de la APP para efectuar consultas, prefieren realizarlo con apoyo de un empleado de la identidad. En otras palabras, se debe capacitar a los usuarios a romper el paradigma de que la tecnología es difícil de utilizar.

Ahora bien, las organizaciones estudiadas manifestaron que el internet de las cosas (incorporación de sensores, software y otras tecnologías) con el fin de conectarse e intercambiar datos con otros dispositivos tienen dificultades por que no todos los clientes tienen teléfonos inteligentes o desconocen el uso de la conectividad en ciertas regiones de Colombia. Es así, como la situación de inversión en tecnología de las cooperativas depende de capacitar a los usuarios (clientes) en el uso de las nuevas aplicaciones. A su vez, hay variables exógenas que las cooperativas no pueden identificar al implementar la tecnología, por ejemplo: redes telefónicas en zonas apartadas de Colombia, instalación de fibra óptica, fallas de energía, dificultad de conectividad inalámbrica de la zona, como el caso de los departamentos de los llanos orientales.

Se identificó que las regiones asiladas difieren de la inversión en tecnologías con las zonas con mayor industrialización. Es decir, las regiones con un pasado de progreso empresarial y cerca de las capitales departamentales tiene un mayor potencial de aplicar nuevas tecnologías; pero en zonas rurales, las organizaciones de economía social y solidaria conserva la gestión del contacto personal y con poca tecnología.

Ahora bien, el gobierno comenzó a aplicar la economía naranja para impulsa el desarrollo culturas de ciertas zonas, pero no identificó la realidad de la complejidad que tiene la región [40]. Es decir, al unir la economía naranja, la tecnología y la cuarta revolución industrial se detecta que las organizaciones de economía social y solidaria no han asumido su rol en implementar en conjunto los tres elementos; además las aplican de forma aisladas. En otras palabras, al unir las podrían generar mayor valor corporativo y modificar los paradigmas de que son exclusivamente empresas sociales.

La cuarta revolución industrial es un apéndice de las tres anteriores con una conceptualización de dependencia de los sistemas de información que satura las organizaciones con datos que no saben utilizar. Además, los beneficios que esta trae son: mejora la productividad, generar seguridad, mejora el tratamiento de datos y condiciona la toma de decisiones a los datos de un sistema. Ahora bien, las organizaciones sociales intentan incorporara la tecnología para aumentar productividad, pero no tienen el personal adecuado; además, el tratamiento de datos desde la aplicación de Big data se frena al no tener sistemas de software y hardware adecuados para la acumulación de muchos datos diarios.

Las organizaciones sociales al utilizar la nube aportan a incrementar los recaudos de fondos y acelerar la innovación intrínseca con un impacto social. Pero, persiste el miedo de fraude en el uso de la tecnología. Además, capacitar al personal apalancaría que los clientes perciban la tecnología como un ente amigable. A su vez, modificar la percepción de generar desempleo al incorporar tecnología y Big data para analizar muchas variables para una acertada toma de decisión. Los datos se acumulan permitiendo analizar regresiones matemáticas para proyectar a las características de los usuarios; por ende, debe invertir en mayor capacidad de los servidores para conservar los datos pasados que aporten a proyecciones sociales, económicas y ambientales.

5. CONCLUSIONES

Las organizaciones de economía social y solidaria en Colombia incorporan poca tecnología para enfrentar la cuarta revolución industrial al tener problemas de incorporar sistemas de información. Además, las organizaciones enfrentan una rivalidad al desconocer que la tecnología de la cuarta revolución del Big data es un medio para obtener datos, pero no información. También, desconocen la aplicación del análisis de la información; es decir, recolectan muchos datos, pero no combinan estos datos para elaborar un perfilamiento estratégico de cada cliente.

Las organizaciones no utilizan la información internacional para actualizar los fenómenos para la toma de decisiones. Además, hay un déficit en la búsqueda de información a nivel nacional sobre las características de los nuevos requerimientos tecnológicos, puesto estos se consideran con un software internacional y no lo adaptan adecuadamente a las condiciones del país. Así mismo, las cooperativas consideran la inversión en Big data y en la nube como tecnología para acercarse a los clientes, pero no es utilizada en su máxima expresión al no analizar la combinación de datos desde la simplificación de la información.

Las mutuales invierten en sistemas integrados para caracterizar a los asociados e impactar en la adquisición de nuevos servicios personalizados. A su vez, las mutuales se enfrentan a que los asociados ligan la gestión como un proceso de consumo; es decir, hay un grupo social que desea tener la última tecnología por presiones sociales, lo que los lleva a endeudarse y no generar ahorro. Al no generar ahorro comienza a debilitar los principios de las cooperativas (aporte social).

Las fallas detectadas para la implementación de tecnología a partir de la cuarta revolución industrial son: falta de cultura frente al uso de los servicios, resistencia al cambio y desarrollos tecnológicos costosos para las organizaciones pequeñas. El sector solidario en general cuenta con población muy adulta que no se relaciona bien con la tecnología. Los empleados tampoco saben muy bien el uso de ciertas herramientas, reacción al cambio, demoras en la implementación de los proyectos, incumplimientos de los proveedores, fallas en la página web y demoras en el tiempo de respuestas a las inquietudes de los usuarios.

La tecnología vista desde la cuarta revolución industrial en las cooperativas de Colombia es escasa en su implementación. Desde las cooperativas financieras se detectó que los jóvenes no tienen una cultura hacia el ahorro, no se capacitan en temas de la importancia del ahorro social. Es decir, desde el mismo hogar no hay cultura para ello, pero si se inculca el uso de tecnologías para la comunicación y ejercer otras actividades académicas y profesionales. Por ende, las cooperativas tienen un nicho de mercado sin atender al no involucrar la tecnología social en los planes de expansión. Además, la tecnología apalanca el contacto directo con este nuevo nicho de mercado. También, aparece la oportunidad de enseñar a ahorrar por medio del uso de las tecnologías, como es el caso de APPs, videos, ticktok, Instagram, linkedin y charlas en YouTube.

Los problemas de la cuarta revolución industrial en la implementación de tecnologías en las cooperativas de económicas social y solidarias en Colombia son dadas por escasez de personal capacitado, errores en la adaptación al cambio, desigualdades sociales y el descontrol de residuos informáticos.

REFERENCIAS

[1] Vandenberg P. (2020). The fourth industrial revolution. En World Economic Forum.

- [2] Mottaeva A. (2016). Basic priorities of innovative development Russian regions. *International Journal of Applied Engineering Research* 11(9), 6808-6816.
- [3] Jones D. y Richardson A. (2017). Origins of sports car marketing: Early 20th Century British cycle-cars. *Journal of Historical Research in Marketing*.
- [4] Shin C. (2016). A conceptual approach to the relationships between the social economy, social welfare, and social innovation. *Journal of Science and Technology Policy Management*.
- [5] Chávez J. y Caicedo A. (2014). TIC y argumentación: Análisis de tareas propuestas por profesores universitarios. *Estudios pedagógicos* 40(2), 83-100.
- [6] Gotesman E. et al. (2019). Effects of the fourth industrial revolution on the israeli economy. *Quality-Access to Success* 20.
- [7] Chen S. et al. (2020). Implementation of a Human-Robot Collaboration System Based On Smart Hand. *Gesture and Speech Recognition* 41(6), 755-762.
- [8] Paswan A. et al. (2017). Attitudinal determinants of environmentally sustainable behavior. *Journal of Consumer Marketing* 34(5), 414-426.
- [9] Zhang D. et. al. (2019). Design, performance, and application of thermoelectric nanogenerators. *Small* 15(32).
- [10] Lombardero L. (2015). *Transformación digital y competencias directivas*. LID Editorial.
- [11] Li Z. et. al. (2017). Reusing heterogeneous data for the conceptual design of shapes in virtual environments. *Virtual Reality* 21(3), 127-144.
- [12] Sanz E. et al. (2021). BiDrac Industry 4.0 framework: application to an automotive paint shop process. *Control Engineering Practice* 109, 104757.
- [13] Fouda T. (2020). Impact of the fourth industrial revolution on the development of scientific research in the field of agricultural engineering in Egypt and Arab World. *Scientific Papers Series-Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development* 20(3), 253-258.
- [14] Talaat F. (2022). Effective prediction and resource allocation method (EPRAM) in fog computing environment for smart healthcare system. *Multimedia Tools and Applications* 81(6), 8235-8258.
- [15] Alfonso R. (2016). Colaborative economy: A new market for the social economy. *Ciriec - España Revista De Economía Publica Social y Cooperativa* 88, 231-258.
- [16] Ahmad T. (2019). Scenarios based approach to re-imagining future of higher education which prepares students for the future of work. *Higher Education, Skills and Work-Based Learning*.
- [17] Xie Y. et. al. (2021). Digital twin for cutting tool: Modeling, application and service strategy. *Journal of Manufacturing Systems* 58, 305-312.
- [18] Shkodina I. et al. (2019). Digital transformation of global banking: Challenges and prospects. *Financial and credit activity: problems of theory and practice* 3(30), 45-51.
- [19] Chang C. (2008). Engineering management in developing economies: The EMIDE strategies to meet the new challenges. En *PICMET'08-2008 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology*.
- [20] Meil P. y Salzman H. (2017). Technological entrepreneurship in India. *Journal of Entrepreneurship in Emerging Economies*.
- [21] Venturini K. y Verbano C. (2017). Open innovation in the public sector: Resources and performance of research-based spin-offs. *Business Process Management Journal*.
- [22] Dominguez R. y Massorali T. (2017). Linkage between dynamics capability and knowledge management factors: A structural equation model. *Management Decision*.
- [23] Amit R. y Zott C. (2001). Value creation in e-business. *Strategic management journal* 22(6-7), 493-520.
- [24] Kargaran S. et al. (2017). Successful customer knowledge management implementation through social media capabilities. *Journal of Information and Knowledge Management Systems*.
- [25] Weresa M. (2019). Technological competitiveness of the EU member states in the era of the fourth industrial revolution. *Economics and Business Review* 5(3).
- [26] Khursheed A. et al. (2019). China-Pakistan economic corridor: a harbinger of economic prosperity and regional peace. *Asian Journal of German and European Studies* 4(1), 1-15.
- [27] Alarcón M. y Álvarez J. (2018). La dimensión sectorial del cooperativismo colombiano a través de un análisis de redes. *Omega*.
- [28] Calle J. et al. (2021). Nonprofit organizations of the fourth sector that promote education social solidarity economy in the fourth industrial revolution of Medellin, Colombia. *Springer*.
- [29] Delgado L. et al. (2017). The boundary conditions of gender diversity in top teams. *Journal of the Iberoamerican Academy of Management*.
- [30] Jäger U. y Schröer A. (2014). Integrated organizational identity: A definition of hybrid organizations and a research agenda. *International Journal of Voluntary and Nonprofit Organizations* 25(5), 1281-1306.
- [31] Gobierno de Colombia. (1988). Ley 79 de 1988. Cooperativismo.
- [32] Función Pública. (1998). Ley 454 de 1998. Recuperado: <http://www.funcionpublica.gov.co/eva>
- [33] Función Pública. (1989). Decreto 1481. Recuperado: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=3365>

- [34] Congreso de Colombia. (2021). Ley 2143. Recuperado: https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY_2143_DEL_10_DE_AGOSTO_DE_2021.pdf
- [35] Gaitán O. y de Bogotá C. (2014). Guía práctica de las entidades sin ánimo de lucro y del sector solidario. Press.
- [36] Glavee R. et al. (2017). Mobile banking services adoption in Pakistan: Are there gender differences? *International Journal of Bank Marketing*.
- [37] Majumdar S. et al. (2015). *Technology and innovation for social change*. Springer.
- [38] Yang Z. (2018). The challenges of personalized learning and their solutions. *Chinese Science Bulletin* 64(5-6), 493-498.
- [39] Kannan P. (2017). Digital marketing: A framework, review and research agenda. *International journal of research in marketing* 34(1), 22-45.
- [40] Gaviria L. et al. (2019). Orange economy: Study on the behavior of cultural and creative industries in Colombia. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* 10(12).

Economía circular en Colombia: Panorama y estrategias para acelerar su implementación

Juan David Carvajalino-Umaña¹

Felipe Romero-Perdomo²

Mauricio López-González³

Natalia Ardila⁴

Miguel Ángel González-Curbelo⁵

^{1, 2, 5} Universidad EAN

^{3, 4} Pacto Global Red Colombia

Colombia

Colombia se enfoca en alcanzar un crecimiento verde alineado a la Economía Circular EC para generar nuevos modelos de negocio basados en transformación productiva y cierre de ciclos de materiales, lo cual se refleja en los avances en investigación y el lanzamiento de la Estrategia de EC ENEC como hoja de ruta. La presente investigación tuvo como objetivo estudiar el progreso de la EC en Colombia mediante un análisis a las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas DOFA, usando como insumo un análisis bibliométrico de la investigación en EC y una revisión de reportes nacionales e internacionales, además, se plantean estrategias que impulsan la implementación de la EC en el país. Se encontró que en Colombia se ha realizado investigación en EC, la cual está consolidada en 116 publicaciones, enfocada principalmente al sector de la construcción y el agro. También hay esfuerzos en análisis de ciclos de vida de procesos lineales en busca de su rediseño circular, incorporando tecnologías como digestión anaeróbica y usando energías renovables como el biogás. Asimismo, tecnologías circulares para plásticos y baterías de zinc-carbono y también la valorización de diversos residuos agroindustriales. Los flujos de residuos sólidos y productos residuales del país mostraron que aproximadamente la mitad de los residuos que se generan tiene potencial de recirculación. Las actividades económicas de los sectores son los mayores generadores de residuos, destacándose los residuos mixtos y comerciales como los provenientes de animales y vegetales, para la cogeneración de energía y el reciclaje. El panorama de estrategias gubernamentales muestra que Colombia cuenta con un marco legal y con políticas públicas en EC y sostenibilidad, con trazabilidad en los flujos de residuos e inversiones circulares, y con fortalecimiento de la labor de los recicladores. Las oportunidades que ofrece la EC radican en aumentar la demanda y mejoramiento de energías renovables, los nuevos mercados sostenibles y empleos, y la competitividad empresarial. Las debilidades y amenazas son la baja inversión en I+D, la baja productividad en los recursos, el bajo nivel de encadenamiento local empresarial, la falta de interés de los productores y de los consumidores, y los altos costos en productos o innovaciones sostenibles para MIPYMES. Se generaron 15 estrategias que consideran que la trazabilidad de indicadores circulares y sostenibles, incentivos financieros, abordajes sociales, la innovación y las alianzas son el camino para cumplir las metas adquiridas por Colombia para el logro de un consumo y una producción sostenible.

¹ Magíster en Proyectos de Desarrollo Sostenible.

Contacto: jcarvaj14023@universidadean.edu.co

² Magíster en Proyectos de Desarrollo Sostenible.

Contacto: fromero44146@universidadean.edu.co

³ Magíster en Centrales Hidroeléctricas.

Contacto: directorejecutivo@pactoglobal-colombia.org

⁴ Magíster en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental.

Contacto: natalia.ardila@pactoglobal-colombia.org

⁵ Ingeniero Químico y Doctor en Química.

Contacto: magonzalez@universidadean.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El modelo de economía lineal de producción y consumo ha estado dominando durante el último siglo en el mundo [1]. Su principal característica es el funcionamiento unidireccional de la cadena de suministro, donde los bienes se fabrican a partir de materias primas, se venden, se utilizan y, posteriormente, al final de su vida útil, el producto se desecha o se incinera [2]. El incremento constante tanto de la población mundial como la urbanización e industrialización ha aumentado los impactos negativos en el medio ambiente, permitiendo evidenciar que los negocios en un modelo lineal no pueden continuar para un futuro y desarrollo sostenible [3].

Varios investigadores han propuesto cambios reflejados en escuelas de pensamiento a favor de un sistema económico industrial más resiliente y verde. De forma cronológica (Figura 1), [4] postuló el diseño regenerativo, afirmando que cualquier sistema se puede organizar con base al funcionamiento de los ecosistemas. Posteriormente, [5] introduce la economía del rendimiento al estudiar cómo un ciclo económico puede incrementar el uso de recursos y la generación de residuos; [6] planteó el metabolismo industrial, profundizando en los mecanismos de circulación de materiales y los flujos de energía en los sistemas productivos; [7] plantean la ecología industrial, optimizando el ciclo total de materiales, desde los naturales originales hasta la materia prima transformada; [5] define la Biomímesis como la innovación inspirada en la naturaleza como modelo para emular formas y procesos para resolver problemas humanos; y [8] exponen el capitalismo natural, basados en la transición desde la economía del consumo a la de los servicios y reinvertir los beneficios obtenidos en garantizar la conservación de los recursos naturales.

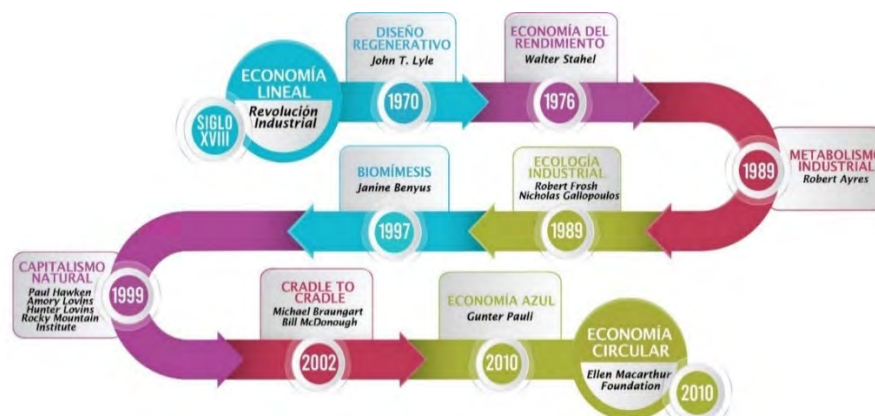


Figura 1. Escuelas de pensamiento relacionadas con el desarrollo de la EC

Luego surgieron tres escuelas de pensamiento: Cradle to Cradle, Economía Azul y Economía Circular EC. Específicamente, [9] desarrolló el concepto Cradle to Cradle C2C basado en tres pilares: 1) eliminar el concepto de residuos, 2) hacer uso de la energía renovable, y 3) promover el diseño sostenible de productos, bienes y servicios [9]. Más adelante [10], dando importancia a los mares y los océanos como motores de la economía para la producción de bienes y servicios con responsabilidad compartida en pro de las generaciones futuras. Luego [11] atribuye mejoras teóricas y prácticas a la sinergia de estas escuelas de pensamiento para darle fin al modelo lineal, proporcionando mayor refinamiento y desarrollo del concepto de recirculación de recursos denominado EC.

La EC es un sistema regenerativo que minimiza la entrada de recursos, la salida de desperdicios, las emisiones y las fugas de energía a través de un diseño duradero, con mantenimiento, reparación, reutilización, remanufactura, restauración y reciclaje [8]. El propósito es cerrar el ciclo de los bienes, aumentando el tiempo de utilidad de los recursos y reduciendo paralelamente la cantidad de residuos. Este concepto distingue entre ciclos técnicos y biológicos [12]. Los ciclos técnicos buscan que el diseño de los bienes permita que sean reutilizables con el tiempo mediante pasos como recolección, procesamiento, producción, compra y consumo (Figura 2). Los ciclos biológicos tratan de la adquisición de materia prima y regeneración de los residuos de tal manera que se reincorporen a la naturaleza, donde la investigación, innovación y desarrollo desempeña un rol fundamental. La unión de ambos ciclos permite alcanzar mayor eficiencia tanto a nivel económico como a nivel ecológico [5].



Figura 2. Ciclo de funcionamiento de la EC

Diversos estudios se han realizado para cuantificar los beneficios que genera la implementación de modelos circulares en los sectores económicos. Por ejemplo, [13] evalúa los beneficios potenciales de la transición a una EC. En dicho informe indicaron que es factible generar oportunidades valoradas en US\$630 mil millones al año solo para un subconjunto de los sectores manufactureros de la Unión Europea. Junto a los enormes beneficios económicos, la EMF señaló los importantes beneficios ambientales y sociales derivados de una EC, como la reducción de 9300 millones de toneladas de CO₂-eq en 2050, equivalente a reducir a cero las emisiones actuales de todo el transporte [14]. Estas cifras han creado una gran conciencia sobre el tema, ya que muchas empresas están dispuestas a aprovechar la oportunidad de obtener una parte de esta oportunidad potencial de ingresos. Asimismo, varios países están lanzando planes de EC para impulsar políticas y metas a la industria y el desarrollo sostenible de sus territorios [15].

Colombia ha implementado una estrategia nacional de EC ENEC como hoja de ruta para avanzar en la transformación productiva de las cadenas de producción y consumo a través del cierre de ciclos de materiales, agua y energía, en nuevos modelos de negocio y en la innovación de sistemas industriales y agroindustriales existentes [16]. La ENEC tiene como expectativa aumentar sustancialmente la tasa de reciclaje, la reutilización de residuos sólidos y de reducir los gases de efecto invernadero [17].

La ENEC ha sido monitoreada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE y en la actualidad se ha publicado el quinto reporte [18]. La EC también ha sido promovida desde el campo de la investigación. Diversos grupos de investigación han enfocado esfuerzos en unir la academia con la industria para evaluar, estandarizar y proponer marcos metodológicos y recomendaciones técnicas para la profundización y potenciamiento de los beneficios de la EC [19].

La presente investigación tuvo como objetivo estudiar el progreso de la EC en Colombia. Un análisis bibliométrico de la investigación en EC realizada en Colombia y una revisión del último reporte de avance de la ENEC fueron llevados a cabo como insumo para realizar un análisis de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas DOFA. Posteriormente, se plantearon estrategias que impulsan la implementación de la EC en el país.

2. MÉTODO

2.1 Análisis bibliométrico

Para estudiar la investigación llevada a cabo sobre EC en Colombia, se realizó un análisis bibliométrico con las publicaciones reportadas en revistas académicas de pares evaluadores indexadas en la base de datos de Scopus. La ecuación de búsqueda fue ("circular *economy") y fue limitada a Colombia como afiliación del país. Como se buscó consolidar las investigaciones reportadas hasta la fecha, no se definió un rango de años para la búsqueda. La búsqueda se realizó el 11 de febrero del 2022, con "topic" como alcance, que incluía el título, resumen y palabras clave. Durante la búsqueda en las bases de datos se seleccionaron todos los tipos de documentos (artículos de investigación, artículos de revisión, conferencias, reportes cortos, libros, etc.) disponibles en inglés. De esta manera, se obtuvieron 116 publicaciones, los cuales fueron exportadas como archivos de valores separados por comas (csv) y se importaron a hoja electrónica 2016.

Debido a que las palabras clave denotan los temas de investigación, el análisis bibliométrico realizado con la base de datos exportada fue un mapa de densidad de las palabras claves más reportadas. Las palabras claves se extrajeron de todas las palabras del título y resumen de las publicaciones mediante el método de conteo completo, y se filtraron por un mínimo de 2 ocurrencias. Dos palabras se definen como co-ocurrentes si aparecen en el mismo documento [20]. Las palabras no relacionadas (nombres de organizaciones, términos genéricos, palabras regionales) y palabras repetitivas (formas singulares y plurales, y abreviaturas) no fueron seleccionadas. Posteriormente, se obtuvo la lista final de palabras clave y el paquete de software VOSviewer 1.6.14 generó el mapa.

2.2 Análisis de contenido

Para analizar la contribución de las estrategias gubernamentales en el sector público y privado, se usaron los dos reportes más recientes emitidos por el DANE, los cuales son el número cuatro, publicado a finales del 2021 y el número cinco, publicado a mediados del 2022. Asimismo, se usó el reporte titulado “Economía circular en América Latina y el Caribe” de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) del 2021 [21]. El análisis de contenido buscó sintetizar los resultados reportados con base a las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuáles materiales han sido incorporados en modelos circulares?
- ¿Qué impactos se han generado?
- ¿Cuáles son los retos y recomendaciones para acelerar la EC en el país?

2.3 Planteamiento del análisis DOFA

Se realizó un diagnóstico de la implementación de la EC en Colombia. Para esto, se llevó a cabo un análisis de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas [22], así como el planteamiento y la descripción de las estrategias generadas a partir de la interacción entre estas. El análisis DOFA es una importante herramienta de apoyo para la toma de decisiones, y es comúnmente usada para coleccionar y analizar información vital del entorno interno y externo de una empresa, institución o territorio [23]. Su desarrollo requiere de la participación de las partes interesadas. Esta herramienta es útil en la formulación de estrategias en relación con una determinada decisión, dado que permite identificar factores como internos (fortalezas, debilidades) o externos (oportunidades, amenazas) [24]. La descripción de cada factor es la siguiente:

- Factores internos
 - *Debilidades*: Una debilidad es un aspecto interno de la empresa, institución o territorio que puede afectar su rendimiento y limitar el alcance de sus acciones y misionalidad.
 - *Fortalezas*: Representa los aspectos internos que se encuentra en mejores condiciones y que permiten aprovechar oportunidades, corregir debilidades y enfrentar las amenazas.
- Factores externos
 - *Oportunidades*: Son condiciones del entorno externo que favorecen el desarrollo de la empresa, institución o territorio. Las oportunidades tienen el potencial de contribuir con el mejoramiento de debilidades, mitigar amenazas y direccionar las estrategias en la búsqueda de nuevos beneficios o de potenciar los existentes.
 - *Amenazas*: Son situaciones, efectos, proyecciones, vinculados al ambiente externo que afectan, en el presente o en el futuro, los planes, rendimientos y en general, el éxito de las decisiones [25].

La interacción de los 4 factores genera cuatro tipos de estrategias:

1. *Estrategias FO*: Son establecidas utilizando las fortalezas internas y las oportunidades externas. Buscan maximizar ambos factores.

2. *Estrategias DO*: Son establecidas utilizando las oportunidades externas y las debilidades internas. Buscan aprovechar las oportunidades para reducir o eliminar las debilidades.
3. *Estrategias FA*: Son establecidas utilizando las oportunidades y las amenazas externas. Buscan aprovechar las oportunidades para reducir o eliminar las amenazas.
4. *Estrategias DA*: Son establecidas utilizando las debilidades internas y las amenazas externas. Buscan reducir o eliminar ambos factores. Por lo general, su formulación es la más compleja [26].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Panorama de la investigación en EC

Como panorama académico para estudiar el progreso de la EC en Colombia, se llevó a cabo un análisis bibliométrico de la investigación con afiliaciones nacionales reportada en la base de datos de Scopus. Los resultados mostraron que en Colombia se ha realizado investigación en EC. La investigación que se ha llevado a cabo se ha consolidado en 116 publicaciones con 430 palabras claves en total. La interacción de las palabras claves es mostrada en un mapa de densidad (Figura 3), el cuál indicó que solo 51 palabras claves presentan mínimo 2 co-ocurrencias. La palabra clave más usada es “EC”, seguida de “sostenibilidad” y “gestión de residuos”. “EC” presentó 64 co-ocurrencias y un enlace de fuerza de 100, “Sostenibilidad” mostró 23 co-ocurrencias y un enlace de fuerza de 63, y “gestión de residuos” tuvo 7 co-ocurrencias y un enlace de fuerza de 23. El top 10 de las palabras claves es completado con “biocombustibles”, “reciclaje”, “evaluación de ciclo de vida”, “digestión anaeróbica”, “energía renovable”, “emisiones de dióxido de carbono”, y el “sector de la construcción”.



Figura 3. Mapa de densidad de las palabras claves más reportadas de las publicaciones indexadas en Scopus sobre EC con afiliaciones colombianas

Las publicaciones que abordaron la “EC” desde una perspectiva general se enfocaron en el diseño de producto circular y en la innovación circular que se puede generar a partir de la química verde [27, 28]. La “sostenibilidad” se ha reportado mediante análisis del pasado, presente y futuro de la contaminación plástica, donde la EC juega un rol relevante para su gestión sostenible [29].

La investigación en “gestión de residuos” ha promovido esfuerzos desde el contexto agrícola y de la construcción. A nivel agrícola, se han realizado valorizaciones de diversos residuos de plátano, papa, huevo, maíz, bagazo de fique, café, entre otros, en busca de la recuperación de nutrientes para procesos de fertilización como también el desarrollo de biomateriales [30 - 33]. Respecto al sector de la construcción, se ha estudiado el impacto ambiental de los cementos de aluminato de calcio y se ha analizado el aprovechamiento de residuos de lodos de lavado de arena como material cementante suplementario [34].

Asimismo, se han realizado diversas formulaciones de concreto sustentable para mitigar la reacción álcali-sílice en agregados de concreto reciclado para infraestructura de concreto, como también se han ejecutado

investigaciones holísticas que permiten identificar impulsores de éxito para implementar la EC en el país [35, 36]. Notablemente, la construcción es el sector económico que mayor énfasis ha recibido.

El “reciclaje”, que es una de las “R” de la EC, ha estado alineado en la investigación de tecnologías para baterías zinc-carbono, evidenciando revisiones sistemáticas y desafíos para una EC en Colombia [37]. La “evaluación de ciclo de vida” es una herramienta funcional para evaluar las entradas y salidas de procesos, y así rediseñar radicalmente los procesos lineales a circulares. Su investigación presenta avances en la evaluación de los residuos de construcción y demolición, plantea indicadores en el sector minero aurífero colombiano, y en estudios basado en digestión anaeróbica en el sector del azúcar de caña [38 - 40].

La “energía renovable” ha sido promovida desde la generación de biogás a partir de residuos orgánicos y de racimos de frutas vacíos, fibra de mesocarpio y efluentes de molinos de aceite de palma [41, 42]. Los trabajos sobre “emisiones de dióxido de carbono” han sido escasos, pero han reflejado la conexión entre la EC y cambio climático [43]. Aunque Los estudios reportados han reconocido que la EC es vital para lograr los objetivos climáticos, algunos investigadores afirman que las soluciones circulares no siempre dan como resultado reducciones de emisiones de gases efecto invernadero por defecto, por lo que es fundamental una evaluación exhaustiva caso por caso [44, 45].

Otras palabras claves encontradas fueron residuos de plátano, recuperación de metabolitos, bioeconomía, objetivos de desarrollo sostenible, cascarilla de arroz, ecodiseño, y biogás. Algunas de estas palabras claves ya fueron abordadas, al estar inmersas en las anteriormente descritas. Cabe destacar que la contribución de la bioeconomía a la economía circular se ha radicado en la generación de productos biobasados que aumentan la disponibilidad de nutrientes en el suelo, cerrando su ciclaje, como también en prácticas sostenibles como reemplazo de las que emplean insumos de energías no renovables [46, 47].

Con base a que la EC se puede implementar y analizar desde tres niveles: macro (país, región, ciudad), meso (parques industriales y redes locales) y micro (empresa, producto, consumidores), el avance en Colombia se encuentra a nivel micro [48]. Sin embargo, no se evidenciaron investigaciones en empresas, instituciones o sistema que mostrarán el establecimiento de flujos o procesos completamente circulares. Por ende, la investigación del país no abarca totalmente el nivel micro. Se recomienda incentivar estudios en parques industriales y redes locales, como también en ciudad, región y país.

3.2 Panorama de estrategias gubernamentales en EC

Distintas son las estrategias adoptadas por Colombia para transitar hacia la EC. La hoja de ruta definida en la ENEC plantea mecanismos de gestión y política pública dirigidas a la innovación y a nuevos modelos de negocio [49]. Estos mecanismos han definido unas líneas de acción alineadas con el desenvolvimiento de la economía del país: 1) flujo de materiales industriales y productos de consumo masivo, 2) flujos de materiales de envases y empaques, 3) flujos de biomasa, 4) fuentes y flujos de energía, 5) flujo de agua, y 6) flujos de materiales de construcción [16].

La recopilación de información para la transformación hacia la EC se ha registrado en los reportes de EC con el objetivo de generar datos para la toma de decisiones y la alineación de la política pública relacionada con la EC [50]. El primer reporte de EC se publicó el 5 de agosto de 2020, documento que constituyó un primer análisis sobre la circularidad en el país. A partir del segundo reporte, se incluyeron diagramas Sankey para representar los flujos de la Cuenta Satélite Ambiental (CSA) y sintetizar el avance en el diseño del Sistema de Información de Economía Circular (SIEC) [50].

El tercer reporte sintetiza información estadística sobre 29 indicadores agrupados en cuatro (4) componentes: 1) demanda de activos ambientales y servicios ecosistémicos, 2) conservación o pérdida de valor de los materiales en el sistema productivo, 3) presión en los ecosistemas por la disposición de residuos, y 4) factores que facilitan la EC. A finales del 2021, con el cuarto reporte de EC, se reportaron 35 indicadores categorizados en los mismos cuatro componentes para el análisis del modelo económico circular y su impacto en los ecosistemas. Con el quinto reporte de EC, se mantuvieron los cuatro componentes y se disminuyeron los indicadores a 16.

Los diagramas Sankey son utilizados para visualizar los flujos de materiales y de energía para el análisis de sistemas [51]. Con esta herramienta, incluida en el cuarto reporte de EC, se muestra en la (Figura 4) el comportamiento de la relación entre la generación de residuos sólidos y productos residuales y su utilización mediante los flujos físicos de las cuentas ambientales y económicas, lectura que se realiza de izquierda a derecha.

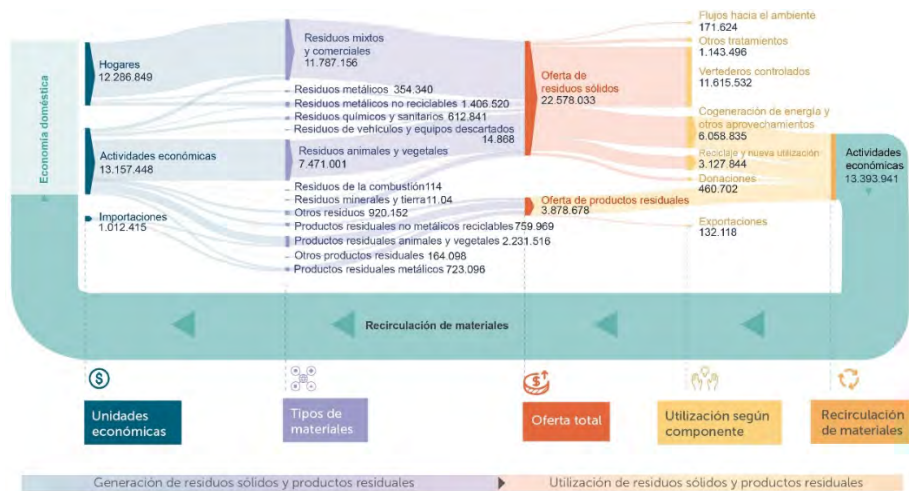


Figura 4. Flujos de residuos sólidos y productos residuales (toneladas)

Las fuentes de generación de residuos sólidos y productos residuales son los hogares, las actividades económicas y las importaciones. Las actividades económicas generan la mayor cantidad de residuos con 13.157.448t, seguida de los hogares con 12.286.849t, y las importaciones con 1.012.415t. La mayor parte de los materiales son generados de los residuos mixtos y comerciales (11.787.156t), derivados de las actividades de consumo por parte de los hogares. En un segundo lugar, se observan los residuos animales y vegetales (7.471.001t) provenientes de las actividades económicas, que a la vez generan la mayor parte de los productos residuales animales y vegetales (2.231.516t). Las importaciones generan dos tipos de productos que son residuos animales y vegetales como también productos residuos metálicos.

En materia de oferta total, la oferta de residuos sólidos (22.578.033t) la compone el consumo de los hogares y de la producción propia de las actividades económicas que a la vez contribuye, en mayor medida, la oferta de productos residuales (3.878.678t). La utilización de la oferta se distribuye en flujos que tienen un final de vida hacia vertederos controlados (11.615.532t), otros tratamientos (1.143.496t), y el ambiente (171.624t). Por otro lado, se observan flujos de materiales hacia las actividades económicas para la cogeneración de energía y otros aprovechamientos (6.058.835t), reciclaje y nuevas utilidades (3.127.844t), y finalmente en donaciones (460.702t). Estos tres usos junto a la oferta de productos residuales (3.745.560t), representan la totalidad de los materiales con potencial de recirculación para futuras actividades económicas (13.393.941t).

3.3 Análisis DOFA

En la actualidad, la urgencia de realizar una transición hacia un modelo económico más sostenible es necesario para los países desarrollados y de ingresos medios y bajos. La economía de Colombia es altamente dependiente del sector extractivo y de una industria de bajo rendimiento, lo que requiere acciones para generar más actividades regenerativas y de valor agregado [52]. Además, la población ha crecido a un ritmo alto, lo que ha llevado a procesos acelerados de urbanización y a problemas de gestión de residuos que requieren soluciones efectivas. Como consecuencia de estos dos factores, se ha evidenciado una creciente degradación ambiental y una pérdida de biodiversidad [53].

En 2018 Colombia asumió el reto de crear nuevas oportunidades de negocio impulsadas por la innovación y la tecnología para gestionar los residuos, buscar la eficiencia en el uso de materiales y crear un nuevo estilo de vida para los colombianos a partir de la EC [21]. La ENEC calcula que la EC puede generar aproximadamente \$11.700 millones de dólares anuales en el ahorro de materiales y en la generación de nuevos negocios como medio para diversificar la economía sin exceder los límites planetarios [16].

El camino de Colombia hacia la EC es largo y en la actualidad se han identificado 4 barreras que son: 1) débil coordinación institucional, 2) ausencia de lineamientos para el diseño ecoeficiente de productos en la cadena de producción, 3) falta de instrumentos de información sobre el consumo de materiales y generación de residuos, y 4) carencia de infraestructura para el tratamiento de residuos y de incentivos a la inversión privada en infraestructura y logística de recuperación de materiales [54]. En respuesta a estas barreras, se han establecido 4 líneas de acción para llevar a cabo la implementación de la EC: 1) desarrollo de instrumentos de planeación y técnicas para la EC, 2) promoción de un consumo responsable y sostenible, 3) fortalecimiento en la gestión de información, y 4) desarrollo de instrumentos de infraestructura y logística [54]. Los vehículos priorizados para la realización de la EC considerados en la ENEC son: 1) modelos de negocio, 2) cadenas de valor o de suministro sostenibles, 3) ciudades sostenibles, 4) parques industriales ecoeficientes, 5) responsabilidad extendida del productor (REP), y 6) consumo sostenible.

Para el diagnóstico de la EC en Colombia, se usó la técnica DOFA, que potencialmente permite evaluar las diversas variables del entorno para priorizar estrategias. Dentro del contexto de la EC, el análisis DOFA ha sido empleado para: 1) analizar la transición hacia la bioeconomía forestal sostenible en Italia [55], 2) identificar los retos y oportunidades para la implementación de la EC en el sector de aguas residuales en la Unión Europea [56], y 3) realizar un estudio de caso en Portugal y Brasil referente a las estrategias y retos de la EC [57], entre otros. Teniendo en cuenta estos antecedentes, el presente análisis DOFA tiene el propósito de realizar un diagnóstico e indicar las estrategias potenciales con respecto a las combinaciones posibles de las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas, para continuar avanzando en la implementación de la EC en Colombia.

El análisis DOFA mostró que los aspectos positivos en Colombia están asociados a 6 fortalezas y 5 oportunidades, mientras que los negativos a 6 debilidades y 4 amenazas (Tabla 1). Específicamente, el análisis resalta el compromiso de Colombia con la EC y el cambio climático, al suscribir instrumentos internacionales y nacionales que contienen herramientas de mitigación y adaptación, entre ellas, desde una perspectiva internacional, como el Acuerdo de París de 2015 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. Desde una perspectiva nacional, se encuentra la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono, el Plan Nacional de Adaptación de Cambio Climático, la Estrategia Nacional de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques, el Sistema Nacional de Cambio Climático, y los esquemas de Responsabilidad Extendida del Productor [58].

Tabla 1. Análisis DOFA de la EC en Colombia.

Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas
(F1) Existencia de marcos legales hacia la EC.	(D1) Inversión en investigación y desarrollo.	(O1) Incremento de la demanda y mejoramiento de energías renovables.	(A1) Altos costos en productos o innovaciones sostenibles para micro, pequeña y mediana empresa (MIPYMES).
(F2) Existencia de políticas públicas transversales.	(D2) Gestión política inadecuada.	(O2) Apertura de nuevos mercados sostenibles e incremento de empleos.	(A2) Inestabilidad política internacional.
(F3) Riqueza en biodiversidad y recursos naturales.	(D3) Recurso humano para ciencia y tecnología.	(O3) Aumento de competitividad e impacto positivo empresarial.	(A3) Desafíos del crecimiento urbano.
(F4) Existencia de la Estrategia Nacional de Economía Circular.	(D4) Productividad en los recursos.	(O4) Etapa de recuperación postpandemia.	(A4) Pérdida de empleo en determinados sectores económicos.
(F5) Trazabilidad en los flujos de residuos e inversiones en EC.	(D5) Falta de interés de los productores y de los consumidores.	(O5) Cambio climático.	
(F6) Fortalecimiento de la labor de los recicladores.	(D6) Bajo nivel de encadenamientos locales entre distintos sectores económicos en una misma área geográfica.		

La biodiversidad es particularmente un aspecto importante para resaltar en Colombia. El país es considerado el más biodiverso del mundo por metro cuadrado, ya que ocupa el primer puesto a nivel global en mayor número de especies de aves y orquídeas, el segundo en plantas, anfibios, mariposas, y el tercer lugar en palma [59]. Esto hace a Colombia un escenario propicio para la implementación de estrategias de bioeconomía circular con énfasis en la biotecnología. Estas estrategias que se reflejan en una gestión más eficiente de los recursos renovables de base biológica pueden generar la valorización de desechos, la utilización de gases efecto invernadero, y la producción de materiales, productos químicos y combustibles de base biológica [60].

El contexto colombiano presenta numerosas barreras internas, que van desde la baja inversión en investigación y desarrollo para impulsar la producción científica en EC, pasando por la baja productividad en los recursos hasta una inadecuada gestión política que legisle un modelo sistémico que incluya los diversos instrumentos en la gestión de residuos. La inversión en ciencia y tecnología, medida principalmente por la inversión en actividades de ciencia, tecnología e innovación ACTI, y la inversión en investigación y desarrollo I+D, bajó como porcentaje del PIB un 0.03 % para los indicadores de 2019 a 2020, lo que impacta la competitividad de los sectores en el mercado global [61].

La inversión en I+D equivale a 0,29 % cuando el promedio de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), de la cual Colombia es parte, es de 2,5 % con respecto al PIB. Un segundo elemento por resaltar es la baja productividad observada en los sectores productivos, especialmente en el sector agrícola, en el cual se consume gran parte de los recursos naturales, pero solo aporta el 7,1 % del PIB a 2017 [16]. Situación similar ocurre en otros sectores, en donde la baja optimización de los recursos sitúa a Colombia por debajo de los países de la OCDE: En 2012, en Colombia se utilizaron 2.28 kg de materiales para producir un dólar de PIB, 2,8 veces mayor que el promedio de la OCDE [54].

Una tercera barrera está relacionada con la implementación de una legislación que integre la totalidad de sectores que intervienen en la EC para de esta manera lograr la distribución de responsabilidades entre los distintos grupos de interés e incentive los encadenamientos locales [21].

Con relación a las oportunidades, la implementación de la EC en el país fortalece la meta del Estado colombiano de multiplicar por 100 veces la capacidad instalada para la generación de energía renovable en 2023 [62]. El objetivo de aumentar la producción de energía renovable requiere el suministro de materiales que la EC puede brindar para el desarrollo de la infraestructura energética sin causar impactos negativos en los ecosistemas al conservar materiales críticos; hacer uso de materiales circulares que generen cero emisiones; y al diseño de sistemas circulares [63].

Las oportunidades también se observan en la apertura de nuevos mercados sostenibles e incremento de empleos. Por un lado, la ENEC estima que la EC tiene un potencial que alcanza los \$11.700 millones de dólares anuales en ahorros de materiales y oportunidades de nuevos negocios [16]. Por otro lado, al fortalecer Colombia la estrategia de crecimiento circular de manera similar a los planes de la Unión Europea, la EC puede crear empleo en sectores como la agricultura, la producción de alimentos, el manejo de residuos, reparación e instalaciones, servicios de gas, electricidad y agua [21].

Siguiendo con el análisis DOFA, la EC es un instrumento que impulsa los cambios sistémicos necesarios para enfrentar los impactos negativos de la economía lineal a partir de la pandemia causada por el SARS-Cov-2 [64]. De acuerdo con [65], América Latina y el Caribe es la región más afectada por la pandemia ante la pérdida en los avances logrados en la reducción de la pobreza y la desigualdad; deterioro económico y social que se refleja en el cierre de empresas, en su mayoría pequeñas y medianas, causando la destrucción de empleos, el aumento de la desocupación, y la reducción de salarios. El camino a la recuperación social y económica es una invitación a los políticos para crear unas condiciones dirigidas a una economía resiliente por medio de iniciativas que incentivan la colaboración e inversiones circulares en cinco sectores claves como son urbanismo, movilidad, envases plásticos, moda, y alimentos y bebidas, estimulando la creación de valor y la resiliencia económica [64].

Finalmente, los altos costos que tienen que asumir las micro, pequeñas y medianas empresas hacen parte de las amenazas frente a la implementación de la EC en el país. El cambio del modelo lineal a circular requiere el uso de recursos adicionales que incluyen la planificación de la producción, la gestión de una red de logística inversa, entre otras. Esos costos adicionales, incluyendo el tiempo para la recuperación de la inversión, son temas más sensibles para las MIPYMES que para las grandes empresas [66]. Por ejemplo, los negocios basados en un modelo de productos por servicios requieren de un mayor costo inicial que los modelos de negocio basados en la venta de productos [67].

Además, la implementación de la circularidad requiere de líneas de financiación que apoyen la innovación, la creación de mercados secundarios, la financiación de infraestructura y la obtención de conocimiento [68]

para lo cual resulta necesario fortalecer las estrategias de inclusión financiera dirigidas a las MIPYMES ante el riesgo de no cumplir con los requisitos de garantía solicitados por la Banca privada.

Con base en todo lo anterior, se plantearon las estrategias DOFA relacionadas en la (Tabla 2) que buscan la maximización de las fortalezas y oportunidades y la minimización de debilidades y amenazas.

Tabla 2. Estrategias para maximizar fortalezas-oportunidades y minimizar debilidades-amenazas de la EC en Colombia

Factores	Fortalezas (F)	Debilidades (D)
	Estrategias de fortalezas-oportunidades (FO)	Estrategias de debilidades-oportunidades (DO)
Oportunidades (O)	(FO1) (F1, F2, F4, F5, O1) Fomentar clústeres para la circularidad de materiales en tecnología e infraestructura energética.	(DO1) (D1, D2, O4) Diversificar la inversión de la recuperación postpandemia hacia sistemas circulares.
	(FO2) (F3, O2, O3) Gestionar los recursos renovables de base biológica hacia modelos de bioeconomía circular.	(DO2) (D5, O2, O3, O4) Empoderar a los productores y consumidores sobre los beneficios de la EC.
	(FO3) (F4, O2, O4) Enfocar la recuperación económica en urbanismo, movilidad, envases plásticos, moda, y alimentos y bebidas.	(DO3) (D4, O2, O3) Aumentar las tasas de reutilización de materiales para su uso como materias primas secundarias.
	(FO4) (F6, O2, O3) Incorporar a los recicladores en las estrategias de recuperación y clasificación de residuos.	(DO4) (D6, O2, O3, O4) Optimizar sistemas de información de disponibilidad de residuos locales.
Amenazas (A)	Estrategias de fortalezas-amenazas (FA)	Estrategias de debilidades-amenazas (DA)
	(FA1) (F1, F2, F3, F4, A1) Incentivar y financiar centros de investigación para alcanzar objetivos a costos bajos.	(DA1) (D2, A2) Fomentar la cooperación internacional para impulsar sistemas circulares transfronterizos.
	(FA2) (F1, A3) Combinar la legislación con instrumentos de gestión, eficiencia y eficacia.	(DA2) (D3, A4) Impulsar políticas de educación en EC en los sectores económicos afectados.
	(FA3) (F2, F6, A3) Idear e implementar políticas de gestión y manejo de residuos para la incorporación de los recicladores de oficio en los retos urbanos.	
	(FA4) (F4, A4) Generar nuevos empleos con la implementación de modelos de negocio circulares.	
	(FA5) (F2, F4, A1) Apoyar el acceso a financiación permanente con énfasis en MIPYMES.	

Las estrategias FO utilizan las fortalezas para aprovechar las oportunidades, por esta razón se destaca la estrategia de gestión de los recursos renovables de base biológica hacia modelos de bioeconomía circular. La intersección entre la EC y la bioeconomía genera la bioeconomía circular que se caracteriza por tener distintos énfasis en la biotecnología para una gestión más eficiente de los recursos biológicos [69]. La estrategia FO3 considera a la pandemia del Cov-sars-2 como un impulsor para la transición hacia un modelo lineal soportado en cinco sectores clave y diez oportunidades de negocio que optimizan el uso y la circulación de activos, materiales y nutrientes. Por ejemplo, la reutilización y reciclaje de materiales de construcción, infraestructura de movilidad multimodal, fortalecimiento de la infraestructura para la recolección de plástico, modelos de negocio para la renta y venta de ropa, y herramientas para la transición hacia una agricultura regenerativa [64].

Las estrategias DO están dirigidas a superar las debilidades por medio de las oportunidades, en este caso, por medio de la inversión y del conocimiento. Siguiendo estos lineamientos, la estrategia DO2 parte de la base que la principal barrera para la transición hacia la EC es la cultural y la falta de conciencia de los consumidores [70]. Superar esta barrera requiere empoderar a los productores y a los consumidores sobre los beneficios económicos, sociales y ambientales que trae la EC. En materia económica la EC crea nuevos mercados, aumenta la inversión y la financiación, optimiza los procesos de producción y genera competitividad. En la dimensión social, invita a un cambio cultural en la producción y a un consumo responsable. En el sector de los alimentos, la circularidad por medio de modelos de negocio basados en el compostaje, la protección de fuentes hídricas, y el uso de tecnología para tecnificar las actividades agrícolas y pecuarias, son un ejemplo de la protección a la biodiversidad por medio de la regeneración [71].

El uso de las fortalezas como medio para evitar o reducir el impacto de las amenazas se conoce como estrategias FA. Una de estas estrategias es la FA2 que busca el desarrollo de una normatividad alineada con la gestión, la eficiencia, y la eficacia de las empresas para que respondan a los retos que existen en las ciudades. Esta alineación de la normatividad no solo incluye la gestión tradicional de los recursos, sino que

genera una visión que integra la totalidad de los sectores y grupos de interés que puedan llegar a intervenir en la EC. La innovación normativa ya cuenta con unos lineamientos, como viene siendo la Política Nacional de Desarrollo Productivo, la Política Nacional de Crecimiento Verde, y la Estrategia Nacional de EC. Con estos marcos normativos se puede impactar regulaciones relacionadas con la seguridad sanitaria de los alimentos o con el uso de vehículos, entre otras. Adicionalmente, crear una legislación que desarrolle sistemas para la recolección de material, la logística inversa, sistemas movilidad, puede impulsar la EC en las MIPYMES para crear clústeres locales de apoyo [72].

La estrategia FA4 es una respuesta a la pérdida causada por la implementación de la EC en el empleo. De acuerdo con la [21], un escenario ambicioso de EC implementado en la Unión Europea genera una pérdida aproximada de 338 mil empleos frente a la creación de aproximadamente 1 millón de puestos de trabajo, siendo el sector que genera más empleo el manejo de residuos. Con relación a América Latina y el Caribe, la implementación de modelos de negocio circulares representa también una fuente de empleo. Es así como, en México se generaría 39 mil plazas de trabajo en el sector de residuos, mientras que, en Chile, se crearían 33 mil empleos directos [21].

Con el fin de superar los límites externos vistos como amenazas y maximizar las fortalezas internas, se establecieron como las estrategias más relevantes la movilización de recursos hacia las MIPYMES (AF2), la recuperación y el fortalecimiento del multilateralismo (AF3), y las soluciones basadas en la naturaleza (AF5). En esta última estrategia se incluyen los distintos métodos que aprovechan la naturaleza para mejorar la sostenibilidad, como las infraestructuras verdes, los espacios verdes, la recuperación de ríos, los servicios ecosistémicos y la adaptación basada en el ecosistema. Mediante la ejecución de esta estrategia se proyecta el logro de cuatro objetivos: 1) Nuevas disposiciones de gobernanza, 2) modelos de negocio, 3) financiación, y 4) participación ciudadana, estando en el centro de esta las MIPYMES.

Con relación a las estrategias que minimizan tanto las debilidades como las amenazas, cabe mencionar que representan el mayor esfuerzo, siendo un reto identificar las acciones que solucionan las problemáticas de manera inmediata. Por su complejidad, nuevamente se recurre a la necesidad de establecer alianzas para incentivar, articular y fortalecer al sector público, al sector privado y a la academia con el objetivo de crear espacios de innovación e inversión en bioeconomía y negocios verdes dirigidos a MIPYMES que busquen incentivos estatales a cambio de ajustar sus servicios y productos al logro del crecimiento verde.

Finalmente, las estrategias DA consisten en tácticas defensivas para reducir las debilidades y evitar las amenazas, más aún cuando las amenazas provienen de una inestabilidad política. Fomentar la cooperación internacional para impulsar sistemas circulares transfronterizos es una estrategia DA que fortalece el uso de estándares y la identificación de certificaciones para productos que se caracterizan por su circularidad, junto a un respaldo internacional, pueden llegar a generar economías de escala y optimizar el intercambio de información y conocimiento [21].

4. CONCLUSIONES

El panorama académico indica que los sectores económicos más beneficiados hasta el momento por la EC son el de construcción y el agrícola. La investigación se está enfocando principalmente en: 1) la valorización de diversos residuos de plátano, papa, maíz, bagazo de fique, y café, 2) tecnologías circulares para plásticos y baterías de zinc-carbono, y 3) análisis de ciclos de vida de procesos lineales para su rediseño circular, incorporando tecnologías como digestión anaeróbica y usando energías renovables como el biogás. Este esfuerzo colectivo representa que la investigación en EC en Colombia se encuentra en el nivel micro de implementación. Proyecciones para abarcar estudios en parques industriales y redes locales (nivel meso) como también en ciudad, región y país (nivel macro) se deben plantear.

Los flujos de residuos sólidos y productos residuales del país sugieren que cerca de la mitad de los residuos tiene potencial de recirculación. Las actividades económicas de los sectores son las que generan la mayor cantidad de residuos con una leve diferencia a los hogares. Los residuos mixtos y comerciales como los provenientes de animales y vegetales son los más predominantes. La cogeneración de energía y el reciclaje son los principales reúsos para múltiples aplicaciones. El panorama de estrategias gubernamentales

muestra que Colombia cuenta con la ENEC como hoja de ruta, marcos legales hacia la EC, políticas públicas transversales en sostenibilidad, riqueza en biodiversidad y recursos naturales, trazabilidad en los flujos de residuos e inversiones en EC, y fortalecimiento de la labor de los recicladores. Las oportunidades que ofrece la EC radican en incrementar la demanda y mejoramiento de energías renovables, los nuevos mercados sostenibles y empleos, y la competitividad e impacto positivo empresarial. Las debilidades y amenazas para mejorar son la inversión en I+D, la productividad en los recursos, el nivel de encadenamientos locales entre distintos sectores económicos en una misma área geográfica, el interés de los productores y de los consumidores, y los costos en productos o innovaciones sostenibles para MIPYMES.

Diversas estrategias que permiten avanzar en la implementación de la EC en Colombia se plantearon. Como ejes transversales se considera que la trazabilidad de indicadores circulares y sostenibles, apalancamiento económico, abordajes sociales, la innovación y las alianzas son esenciales para cumplir las metas adquiridas por Colombia en el logro de su crecimiento verde.

REFERENCIAS

- [1] Sariatli F. (2017). Linear Economy versus Circular Economy: A comparative and analyzer study for Optimization of Economy for Sustainability. *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development* 6(1), 31-34.
- [2] Ghosh S. (2020). *Circular economy: global perspective*. Springer.
- [3] Bonciu F. (2014). The European Economy: From a Linear to a Circular Economy. *Romanian Journal of European Affairs* 14(4), 78-91.
- [4] Martínez A. y Porcelli A. (2018). Estudio sobre la economía circular como una alternativa sustentable frente al ocaso de la economía tradicional (primera parte). *Revista de la Facultad de Derecho y Ciencia Política de la Universidad Alas Peruanas* 16(22), 301-334.
- [5] Moreno A. Y. (2018). *Economía circular: Crecimiento inteligente, sostenible e integrador*. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales.
- [6] Herrero L. M. et al. (2020). *Economía Circular-Espiral: Transición hacia un metabolismo económico cerrado*. Ecobook.
- [7] Prieto V. et al. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación sustainability and strategies for its implementation. *Memoria Investigaciones En Ingeniería* 15, 85-95.
- [8] Geissdoerfer M. et al. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production* 143, 757-768.
- [9] McDonough W. et al. (2003). Applying the principles of green engineering to cradleto-cradle design. *Environmental Science & Technology* 37(23), 434A-441A.
- [10] Kaczynski W. (2011). The Future of Blue Economy: Lessons For European Union. *Foundations of Management* 3(1), 21-32.c
- [11] MacArthur E. (2013). Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology* 2, 23-44.
- [12] Murray A. et al. (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of business ethics* 140(3), 369-380.
- [13] Ellen MacArthur Foundation. (2012). *Towards the circular economy: Economic business rationale for an accelerated transition*.
- [14] Materials Economics. (2018). *The Circular Economy - A Powerful Force for Climate Mitigation*. Recuperado: <https://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy-a-powerful-forcefor-climate-mitigation-1>
- [15] Ghosh S. y Ghosh S. (2021). *Circular Economy: Recent Trends in Global Perspective*. Springer.
- [16] Gobierno de la República de Colombia. (2019). *Estrategia nacional de economía circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*. Bogotá.
- [17] Romero F. y Carvajalino J. (2021). *Impacto de la economía circular en los objetivos de desarrollo sostenible*. Tesis de Maestría. Universidad EAN. Colombia.
- [18] DANE. (2022). *Economía Circular: Quinto reporte*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- [19] García C. y Cayzer S. (2019). Assessment of the circular economy transition readiness at a national level: The Colombian case. En *The Circular Economy and the Global South* (pp. 113-133). Routledge.
- [20] Flórez D. et al. (2020). A systematic analysis of non-centrifugal sugar cane processing: Research and new trends. *Trends Food Sci. Technol.* 2020, 107, 415-428.
- [21] C. de Miguel K. et al. (2021). *Economía circular en América Latina y el Caribe: Oportunidad para una recuperación transformadora*. CEPAL.
- [22] Gürel E. (2017). SWOT Analysis: A theoretical review. *Journal of International Social Research* 10(51), 994-1006.
- [23] Benzaghta et al. (2021). SWOT analysis applications: An integrative literature review. *Journal of Global Business Insights* 6(1), 55-73.

- [24] Zakeri S. et al. (2022). The Grey Ten-Element Analysis Method: A Novel Strategic Analysis Tool. *Mathematics* 10(5), 846.
- [25] Barragán C. y González G. (2020). Análisis FODA como elemento de la planeación estratégica. *Revista Daena* 15(1).
- [26] OrtízF. J. Diago J. (2014). Priorización de estrategias corporativas y competitivas a partir de la integración del análisis DOFA y la herramienta multicriterio ANP.
- [27] Aguiar M. et al. (2021). Circular product design: strategies, challenges and relationships with new product development. *Management of Environmental Quality*.
- [28] Londoño N. y Cabezas H. (2021). Perspectives on circular economy in the context of chemical engineering and sustainable development. *Current Opinion in Chemical Engineering* 34, 100738.
- [29] Williams A. y RangelN. (2022). The past, present, and future of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin* 176, 113429.
- [30] Quisperima A. et al. (2022). Valorization of potato peels and eggshells wastes: Ca-biocomposite to remove and recover phosphorus from domestic wastewater. *Bioresource Technology* 343, 126106.
- [31] Durán D. et al. (2021). Scientometric Overview of Coffee By-Products and Their Applications. *Molecules* 26(24).
- [32] Alzate S. et al. (2021). Recovery of banana waste-loss from production and processing: a contribution to a circular economy. *Molecules* 26(17), 5282.
- [33] Castrillón H. et al. (2021). Circular Economy Strategies: Use of Corn Waste to Develop Biomaterials. *Sustainability* 13(15), 8356.
- [34] Zapata J. et al. (2022). Environmental Impact and Sustainability of Calcium Aluminate Cements. *Sustainability* 14(5), 2751.
- [35] Cassiani J. et al. (2021). Sustainable concrete formulations to mitigate Alkali-Silica reaction in recycled concrete aggregates (RCA) for concrete infrastructure. *Construction and Building Materials* 307, 124919.
- [36] Torres L. et al. (2021). Success drivers for implementing circular economy: a case study from the building sector in Colombia. *Sustainability* 13(3), 1350.
- [37] Cardona N. et al. (2020). Recycling Technologies of Zn-C Batteries: Review and Challenges for a Circular Economy in Colombia. *Energy Technology 2020: Recycling, Carbon Dioxide Management, and Other Technologies* 377-386.
- [38] Mesa J. et al. (2021). Life cycle assessment on construction and demolition waste: A systematic literature review. *Sustainability* 13(14), 7676.
- [39] Mendieta O. et al. (2021). Low-cost anaerobic digester to promote the circular bioeconomy in the non-centrifugal cane sugar sector: A life cycle assessment. *Bioresource technology* 326, 124783.
- [40] Cano N. et al. (2020). Exergy life cycle assessment indicators in Colombian gold mining sector. *Journal of Sustainable Mining* 19.
- [41] Contreras M. et al. (2020). A Look to the Biogas Generation from Organic Wastes in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy* 10(5), 248.
- [42] Voogt J. A. et al. (2021). Improving sustainability and circularity of palm oil by anaerobic digestion of empty fruit bunch, mesocarp fibre, and palm oil mill effluent, enabling self-sufficient energy production from biogas.
- [43] Romero F. et al. (2022). Research Trends on Climate Change and Circular Economy from a Knowledge Mapping Perspective. *Sustainability* 14(1), 521.
- [44] Van Ewijk S. et al. (2021). Stegemann, J.A.; Ekins, P. Limited climate benefits of global recycling of pulp and paper. *Nat. Sustain.* 4, 180-187.
- [45] Cantzler J. et al. (2020). Saving resources and the climate? A systematic review of the circular economy and its mitigation potential. *Environ. Res. Lett.* 15, 123001
- [46] Santos M. et al. (2021). Genomic and phenotypic analysis of rock phosphate-solubilizing rhizobacteria. *Rhizosphere* 17, 100290.
- [47] Romero F. et al. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria and their potential as bioinoculants on *Pennisetum clandestinum* (Poaceae). *Revista de Biología Tropical* 67(4), 825-832.
- [48] Nikolaou I. et al. (2021). Circular economy and sustainability: the past, the present and the future directions. *Circular Economy and Sustainability* 1(1), 1-20.
- [49] Van Hoof B. y Saer A. (2022). Public Policy for Circular Economy: The Case of the National Strategy of Circular Economy in Colombia. En Alvarez A. et al. (eds.), *Towards a Circular Economy. CSR*.
- [50] DANE. (2021). *Economía Circular: Cuarto reporte*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- [51] Lupton R. y Allwood J. (2017). Hybrid Sankey diagrams: Visual analysis of multidimensional data for understanding resource use. *Resources, Conservation & Recycling*.
- [52] OECD. (2013). *OECD Economic Surveys: Colombia 2013: Economic Assessment*. OECD Publishing.
- [53] García C. (2016). *Circular Economy Transition in the Context of Low and Middle-Income Countries*. Tesis de maestría. University of Bath.
- [54] DNP. (2018). *Política de crecimiento verde Documento CONPES 3934 de 2018 Resumen ejecutivo*. Departamento Nacional de Planeación.
- [55] Falcone P. et al. (2020). Towards a sustainable forest-based bioeconomy in Italy: Findings from a SWOT analysis. *Forest Policy and Economics* 110, 101910.

- [56] Guerra S. et al. (2020). Towards the Implementation of Circular Economy in the Wastewater Sector: Challenges and Opportunities. *Water* 12(5), 1431.
- [57] Oliveira F. et al. (2020). Strategies and Challenges for the Circular Economy: a Case Study in Portugal and a Panorama for Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 63.
- [58] De la Rosa M. (2020). La transición energética del país, como estrategia de desarrollo sostenible frente al cambio climático. Recuperado: <https://medioambiente.uexternado.edu.co/la-transicion-energetica-del-pais-como-estrategia-de-desarrollo-sostenible-frente-al-cambio-climatico/>
- [59] OECD. (2014). "Biodiversity" in *OECD Environmental Performance Reviews: Colombia 2014*, OECD Publishing.
- [60] Hadley E. et al. (2010). The Sustainable Path to a Circular Bioeconomy. *Science & Society*.
- [61] Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología. (2020). *Indicadores de Ciencia y Tecnología*. Colombia.
- [62] DNP. (2022). Colombia multiplicará 100 veces su producción energética a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables en 2023. Departamento Nacional de Planeación.
- [63] World Economic Forum. (2022). 3 ways circular economy is vital for the energy transition. Recuperado: <https://www.weforum.org/agenda/2022/02/3-ways-circular-economy-renewables-energy-transition/>
- [64] Ellen MacArthur Foundation. (2020). The circular economy: A transformative Covid-19 recovery strategy: How policymakers can pave the way to a low carbon, prosperous future.
- [65] Hernández R. (2022). Informe de política regional sobre el fomento de la resiliencia económica urbana durante la pandemia de COVID-19 y en el período pospandemia en América Latina y el Caribe. CEPAL.
- [66] Rizos V. et al. (2016). Implementation of Circular Economy Business Models by Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs): Barriers and Enablers. *Sustainability* 8, 1212.
- [67] Besch K. (2005). Product-service systems for office furniture: barriers and opportunities on the European market. *Journal of Cleaner Production* 13(10).
- [68] Circular Economy Coalition. (2022). *Economía circular en América Latina y el Caribe: Una visión compartida*.
- [69] Kerchaw E. et al. (2020). The sustainable path to circular bioeconomy.
- [70] Kirchherr J. et al. (2018). Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). *Ecological Economics*.
- [71] B. Van Hoof G. et al. (2022). Metodología para la evaluación de avances en la economía circular en los sectores productivos de América Latina y el Caribe. CEPAL.
- [72] Tackacs F. et al. (2022). Barriers to a circular economy in small - and medium- sized enterprises and their integration in sustainable strategic management framework. *Journal of Cleaner Production* 362, 132227.

Análisis de los procesos relacionados con la producción desde gestión de calidad de empresas farmacéuticas: Una revisión de la literatura

Liset Dayana López Sarmiento¹
Sylvia María Villarreal-Archila²
Katherine Julieth Sierra Suarez³
Silvia Juliana Rodríguez Mogotocoro⁴
Unidades Tecnológicas de Santander
Colombia

Se realizó una investigación exploratoria para analizar los procesos de gestión de calidad que aplica la industria farmacéutica. Se partió de la búsqueda y registro de referentes documentados, casos de éxito de empresas en Colombia e internacionales que hayan implementado y documentado técnicas. Se identificaron 20 documentos asociados a la temática, compilando finalmente ocho casos de estudio de éxito. Los resultados se organizaron por medio de una ficha técnica de cada proceso, lineamiento y política ejecutados por las empresas, y se completó con un análisis comparativo entre los casos según sus coincidencias, técnicas y factores determinantes de éxito en el proceso de la gestión de la calidad. Se evidenció que dentro de los principales procesos exitosos utilizados por las organizaciones para gestionar la calidad en la producción se encuentran: análisis de la gestión de actividades, integración de listas de chequeo, inclusión de la metodología causa-efecto, Lean Management, mejora continua, comparación entre la gestión documentada y la gestión realizada, el análisis de casos de estudio de referencia y la evaluación cualitativa y cuantitativa de la producción mediante métodos experimentales, e incluso la fusión de dos o más procesos. Este trabajo se convierte en un punto de aprendizaje en la enseñanza en calidad aplicada a uno de los sectores económicos más rigurosos y orienta la identificación de tendencias organizacionales.

¹ Tecnóloga en Producción industrial.

Contacto: ldayanalopez@uts.edu.co

² Ingeniera Industrial y Magíster en Ingeniería industrial.

Contacto: sy.villareal@correo.uts.edu.co

³ Ingeniera Industrial y Magíster en Ingeniería industrial.

Contacto: ksierra@correo.uts.edu.co

⁴ Ingeniera Industrial.

Contacto: sjrodriguezmogotocoro@uts.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia el sector farmacéutico creció un 26,9% con relación al 2019, aportando al PIB de la nación 4,10% en 2020 [1]. Para las empresas que fabrican farmacéuticos el control y la gestión de la calidad radica en la garantía de que el objeto de interés cuente con las especificaciones establecidas [2]. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud OMS [3], uno de cada diez medicamentos en países en desarrollo es de baja calidad o falsificado, no aliviando ni atacando enfermedades, significando una pérdida de dinero y en muchos casos, generando nuevos padecimientos e incluso la muerte.

Los laboratorios farmacéuticos en Colombia y en otras partes del mundo deben trabajar los estándares de Buenas Prácticas de Manufactura BPM que se han orientado a nivel internacional [4]. La gestión de la calidad debe encontrarse en cambios constantes, permitiendo desarrollar su dinámica económica pero también cumplir con los criterios legales expedidos por las autoridades competentes. La calidad no solo es la entrega de un producto que cumpla con los estándares sino una integralidad de procesos y prácticas organizacionales dados en su línea de producción [5].

Según [6], para la industria farmacéutica, la gestión de la calidad evita no solo que ocurra algún tipo de falla que provoque inconvenientes internos sino que a su vez genera una confiabilidad en los pacientes a los cuales se les suministran las dosis, por eso, la relevancia de avanzar en la mejora de estos procesos desde la academia, sin desconocer que la prevención de los riesgos en las áreas de producción, evita sanciones y cualquier novedad que involucre recursos que las empresas puedan, o no tener a disposición.

Los retos que asume la industria farmacéutica son interminables, empezando por el hecho de que están siendo vigilados constantemente por investigadores del sector, los cuales cuestionan la transparencia de la industria y atribuyen a los fármacos como la tercera causa de muertes en el mundo; sea por efectos secundarios, formulaciones erradas, fallas en la calidad o la imposibilidad de acceder a ellos de manera oportuna [7].

Desde el proceso de obtención de las materias primas, pasando por la producción y terminando con la venta de los fármacos, las empresas farmacéuticas deben garantizar la calidad a los consumidores, razón por la que deben cumplir con una amplia normativa como las resoluciones, decretos, acuerdos, circulares, leyes y normas que se convierten en un proceso complejo para obtener la certificación habiendo cumplido con los requisitos necesarios [7].

Gestionar la calidad en las empresas no solo ha significado cumplir con los requisitos, sino que también ganancias para todas las empresas farmacéuticas que han buscado implementar y lograr una certificación asociada, esto ha traído consigo la mejora en el desempeño, control de riesgos, mayor productividad, disminución de costes y además les ha dado una confiabilidad para los clientes (ISO 31000, 2018).

En 2019, Colombia Productiva lanzó el plan de negocios para el sector farmacéutico, proyectando que para 2032 crecerá cuatro veces llegando a ventas hasta por \$63,4 Billones [8]. En las empresas que se encuentran vinculadas al sector productivo farmacéutico, la gestión de la calidad se convierte en un instrumento de carácter estratégico para la prevención y acción en un caso de potencial amenaza que pueda existir bajo su línea de producción, es por ello, que en esta investigación se planteó analizar cómo trabaja el sector farmacéutico la gestión de la calidad, a través de los procesos exitosos, lo cual permitiría realizar las acciones necesarias encaminadas a su crecimiento económico, desarrollo tecnológico, la cohesión con las políticas medioambientales y la agenda por el desarrollo sostenible 2030 que en su objetivo tres aborda la salud y el bienestar desde una perspectiva de acceso universal y garantista [10].

2. MÉTODO

En esta investigación se realizó un estudio analítico con el objetivo de encontrar en la literatura los procesos que actualmente están siendo implementados por farmacéuticas para la gestión de la calidad en la producción, este estudio tuvo un enfoque cualitativo debido a que la información recopilada es de carácter interpretativo. Los datos para el análisis se recolectaron en estudios de caso publicados que describían,

mediante observación y estudio de la naturaleza particular de la empresa, los procesos implementados para la gestión de la calidad en las farmacéuticas [11]. Por lo tanto, en la metodología para la recopilación de información se aplicaron técnicas documentales tales como la revisión de la literatura y el análisis de documentos por medio de instrumentos como artículos científicos, investigaciones previas y proyectos universitarios. Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre los casos de estudio que habían sido recopilados anteriormente, análisis de coincidencias, técnicas y factores determinantes de éxito en su proceso de gestión de la calidad. Las fases de desarrollo se describen en la Figura 1.



Figura 1. Fases de desarrollo de la revisión de casos de éxito

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Búsqueda y clasificación de la documentación disponible

El tema central de este estudio son los procesos implementados para gestionar la calidad reportados en los casos de estudio. Para la primera etapa de esta investigación se recopilaron investigaciones sobre empresas farmacéuticas que incorporaron en sus procesos productivos la gestión de la calidad en la búsqueda de beneficios económicos, de eficiencia y productividad. La búsqueda se realizó en bases de datos académicas reconocidas con el fin de garantizar la confiabilidad. Se definieron una serie de criterios de investigación asociados a los filtros de búsqueda en las bases de datos académicas para realizar la indagación, como se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de investigación

Antigüedad	2016 - 2021
Acceso	Abierto
Palabras clave	Sector farmacéutico
	Producción de fármacos
	Gestión de la calidad
	Mejora de procesos
Áreas y temática	Ciencias de la salud
	Ingenierías Médicas
	Farmacología
Tipo de documento	Artículos
	Informe de caso
	Tesis
	Proyectos investigativos

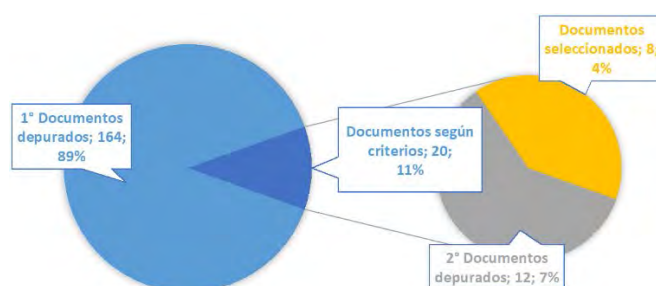
Posterior a la búsqueda en las bases de datos y con los respectivos criterios de investigación se aplicaron los respectivos filtros de búsqueda con el fin de reducir el grupo objetivo de documentos lo más específico posible verificando que se cumplieran los criterios establecidos y se depuraron los que se alejaron del grupo característico de la investigación. En la Tabla 2 se presenta los resultados de la primera depuración.

Tabla 2. Depuración inicial

Sin filtros de búsqueda		Con filtros de búsqueda	
Tipo de documento	Cantidad	Tipo de documento	Cantidad
Artículos de revisión	110	Artículos de revisión	14
Tesis / proyectos de grado	32	Tesis / proyectos de grado	4
Informe de casos	16	Informe de casos	2
Otros	26		
Total	184	Total	20

3.2 Selección de la documentación

Con los documentos depurados, se procedió a la selección final de los documentos a través de la lectura de títulos, validación de la concordancia con la temática y también con la lectura del resumen e introducción de los trabajos comprobando que los criterios de búsqueda se vieran identificados en los resultados. En la Figura 2 se evidencia el resultado del número de documentos que utilizados en el posterior análisis.

**Figura 2.** Estadística depuración y selección de documentos

3.3 Registro de la documentación

Posterior a la identificación de casos de éxito, se realizó una lectura minuciosa de los procesos de desarrollo de cada caso para resaltar la información relevante como las principales causas que originaron la necesidad de implementación o mejora de la gestión de calidad, las metodologías y procesos desarrollados, y los beneficios o cambios identificados a partir de la implementación. Para el registro de la documentación se diseñó una bitácora organizada en dos secciones:

1. *Identificación de cada documento:* Nombre de la investigación, autor, enlace de acceso, año de acceso, año de publicación, institución donde se realizó la investigación, empresa farmacéutica, país y las palabras claves asociadas a la investigación.
2. *Contexto de desarrollo:* Objetivo general de la investigación, resumen del diagnóstico actual, metodología y/o técnica aplicada, actividades desarrolladas y los resultados positivos y negativos identificados posterior a la implementación.

En la Tabla 3 se puede observar la bitácora de registro correspondiente a la empresa farmacéutica Tracerlab, la radio farmacia más grande de Colombia.

Tabla 3. Bitácora de registro TRACERLAB S.A.S.

Nombre de la investigación	Propuesta de mejora para el sistema de gestión de calidad de radio farmacia Tracerlab S.A.S; bajo los lineamientos de la norma NTC ISO 9001:2015		
Autor	Fabio Nicolás Chaves Gómez, Fausto Adrián Girón Molina, Carolina Ávila Andrade		
Disponible en	https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/17612/2019carolinaavila.pdf?sequence=27&isallowed=y	Año	2019
Institución de investigación	Universidad Santo Tomás		
Institución farmacéutica en estudio	Tracerlab s.a.s.		
País/ciudad	Colombia	Palabras clave	Farmacia, ISO 9001:2015, sistemas gestión de calidad, mejora
Objetivo general	Mejorar el sistema de gestión de calidad de la empresa radio farmacia Tracerlab, basados en los requerimientos de la norma ISO 9001:2015, que permitirá fortalecer la operación de todos los procesos, obteniendo una mejor perspectiva del cliente.		

Diagnóstico actual	Cuenta actualmente con un sistema de gestión de calidad bajo la norma ISO 9001:2008 por exigencia del Invima, pero su gestión real es débil y desactualizada acorde a las normas internacionales, limitado solo a la documentación y no a las características funcionales del sistema de gestión de la calidad.		
Metodología / técnica	Análisis con herramientas Pestal y Dofa y actualización ISO 9001: 2015		
	Actividades realizadas		Resultados positivos
1	Diagnóstico del sistema de gestión de la calidad actual.	1	Generación de valor agregado.
2	Evaluación de funcionalidad del sistema de gestión de la calidad (sgc) actual.	2	Mejora continua.
3	Evaluación de cumplimiento del sgc frente a los numerales de la norma ISO 9001:2015	3	Cumplimiento a las buenas prácticas de elaboración de radiofármacos (bper)
4	Identificación de los numerales críticos para la mejora mediante matriz de priorización.	4	Confiabilidad de la calidad de los productos.
5	Valoración del incumplimiento del sgc	5	oportunidades para certificación internacional
6	Identificación de aspectos por mejorar y por actualizar.		
7	Planteamiento de actividades para la mejora y actualización del sgc.		

En la Tabla 4 se relaciona la bitácora de registro de la empresa Bayer, una de las marcas más conocidas en el mundo.

Tabla 4. Bitácora de registro: BAYER AG

Nombre de la investigación	Lean management en la industria farmacéutica: el caso de Bayer AG en China.		
Autor	Mengting Fu		
Disponibile en	https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/5548/E07905338_GADE_Julio161.pdf;jsessionid=75DC03D4BB8CB6517B9A5779D3FF33FC?sequence=1	Año	2016
Institución de investigación	Universidad de León		
Institución farmacéutica en estudio	BAYER AG (CHINA)		
País/ciudad	España	Palabras Clave	Industria Farmacéutica, Lean Management, Sistemas de Gestión, Proyecto de OEM, Bayer
Objetivo general	Poner en marcha los análisis del sistema de gestión en la empresa del sector farmacéutico, a través del análisis de la situación en la que se aplica <i>Lean Management</i> dentro de una organización, para intentar concluir y deducir la situación general dentro de la industria farmacéutica si se utiliza el sistema <i>Lean</i> . Bayer contaba con una alianza con la compañía Shangai Roche, por el proyecto para el procesamiento de Vitamina C y Paracetamol, el cual fracasó debido a los altos costos de producción que representan una reducida, casi nula, utilidad. Posteriormente, Bayer comenzó a buscar un nuevo socio y en 2009 firmó convenio con XH Pharma (proyecto de OEM), pero para esta alianza se implementó metodología Lean Management en todos los procesos para garantizar la producción de calidad, oportuna y con el máximo beneficio para la compañía.		
Diagnóstico actual			
Metodología / técnica	Lean Management		
	Actividades realizadas		Resultados positivos
1	Identificación de aspectos/ áreas/ factores a mejorar.	1	Mejora en la producción (aumento de producto terminado).
2	Relacionamiento de factores a mejorar con aspectos del <i>Lean Management</i> .	2	Aumento de márgenes interiores.
3	Asignación de roles y actividades para implementación de <i>Lean Management</i> .	3	Aumento de beneficio neto
4	Integración de técnicas <i>Lean Management</i> en cada aspecto	4	Mejor posicionamiento en el mercado farmacéutico en China
5	Análisis de la aplicación de <i>Lean Management</i> .		
6	Evaluación de resultados.	6	

En la Tabla 5 se puede observar la bitácora de registro de una empresa farmacéutica anónima de Cuba que cuenta con un sistema de gestión, pero del cual no reconoce su efectividad ni cumplimiento.

Tabla 5. Bitácora de registro: Anónima A, Cuba

Nombre de la investigación	Calidad, medio ambiente, seguridad y salud, y control interno en el contexto económico actual: diagnóstico de un laboratorio farmacéutico cubano		
Autor	Vivian Isabel Antúnez Saiz, María V. Fernández Lloret, Mercedes Delgado Fernández		
Disponibile en	http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s2073-60612017000100017&lang=es	Año	2017
Institución de investigación	Universidad de la Habana y Universidad Tecnológica de la Habana.		
Institución farmacéutica en estudio	Anónimo		
País/Ciudad	Cuba	Palabras clave	Diagnóstico, Eficiencia, Industria Farmacéutica, Sistema de gestión.
Objetivo general	Lograr una posición más competitiva en el mercado ganando una imagen acompañada de la confianza de los clientes y las partes interesadas basado en normas internacionales como la ISO 9001 de calidad, la ISO 14001 de medio ambiente y la OSHAS 18001 de seguridad y salud.		

Diagnóstico actual	Una farmacéutica cubana cuenta con un Sistema de Gestión, del cual desconoce el cumplimiento y la aplicabilidad real del mismo, como también qué tan funcional es para la compañía, para esto se realiza un diagnóstico identificando falencias como la falta de integración entre procesos y dependencias, y dispersión de información.	
Metodología/Técnica	Basados en normas ISO 9001 de calidad, la ISO 14001 de medio ambiente y la OSHAS 18001 de seguridad y salud.	
	Actividades realizadas	Resultados positivos
1	Encuestas y entrevistas sobre la aplicabilidad de los aspectos de los Sistemas de Gestión.	1 Mejora continua en los procesos.
2	Diagnóstico actual del cumplimiento de los Sistemas de Gestión.	2 Mayor efectividad en la toma de decisiones.
3	Identificación de fortalezas y debilidades de la gestión del laboratorio.	3 Coordinación a los logros esperados.
4	Planteamiento de oportunidades de mejora.	4 Mayor control de la gestión de riesgos
		5 Identificación de medidas preventivas y no solo correctivas.

En la Tabla 6 se observa la bitácora de registro correspondiente a la empresa farmacéutica peruana Medifarma la cual cuenta con reconocimiento internacional.

Tabla 6. Bitácora de registro: MEDIFARMA S.A, Perú

Nombre de la investigación	Evaluación de dos atributos de calidad críticos en la producción de formas farmacéuticas sólidas utilizando la espectroscopia de infrarrojo cercano	
Autor	Rubén Cueva Mestanza	
Disponible en	http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1810-634x2018000400007&lang=es	Año 2018
Institución de investigación	Universidad María Auxiliadora	
Institución farmacéutica en estudio	Medifarma S.A	
País/Ciudad	Perú	Palabras clave Espectroscopia De Infrarrojo Cercano, Atributos Críticos, Comprimidos Farmacéuticos, Tecnología Analítica De Procesos PAT.
Objetivo general	Construir la calidad del producto final, controlando atributos críticos de calidad de los productos intermedios en el mismo proceso aplicando la Tecnología Analítica de Procesos PAT.	
Diagnóstico actual	Medifarma busca mejorar la calidad de los fármacos producidos, para esto quiere considerar las etapas críticas del proceso con el fin de garantizar menores riesgo de daños durante el proceso de fabricación y conservar las propiedades correctas para su uniformidad.	
Metodología/técnica	Evaluación de procesos de fabricación con carácter experimental.	
	Actividades realizadas	Resultados positivos
1	Identificación de los riesgos en los atributos que afectan la calidad de los fármacos.	1 Aumento de productividad
2	Identificación de los procesos clave para la gestión de la calidad.	2 Resultado con productos seguros al consumo.
3	Examinar la aplicación de la espectroscopia NIR para determinar el punto final del mezclado.	3 Reducción del ciclo productivo
4	Examinar el uso de la espectroscopia NIR para predecir humedad en los granulados	4 Menor número de tabletas rotas por altos porcentajes de humedad.
5	Evaluación de los resultados de la fase experimental	5 Mayor uniformidad y mejor compactación de las tabletas.
6	Determinación punto final para homogeneidad y humedad en el mezclado	6 Dosificación más acertada en cada fase de mezclado.

En la Tabla 7 se dispone la información de la bitácora de registro de una empresa farmacéutica ecuatoriana que busca establecer los lineamientos y normativas que el sector debe integrar para asegurar la calidad de sus productos.

Tabla 7. Bitácora de registro: Anónima B, Ecuador

Nombre de la investigación	Control de calidad en la industria farmacéutica	
Autor	Camilo Eduardo Daste Ramírez	
Disponible en	http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8731/Control%20de%20Calidad%20en%20la%20Industria%20Farmac%3a9utica.pdf?sequence=1&isAllowed=y	Año 2015
Institución de investigación	Pontificia Universidad Católica del Ecuador	
Institución farmacéutica en estudio	Anónima	
País/ciudad	Ecuador	Palabras clave Calidad, Control De Calidad, Eficacia, Medicamento, Seguridad
Objetivo general	Dar a conocer la importancia del Control de Calidad en la Industria Farmacéutica con la finalidad de establecer los lineamientos y las diferentes normativas que se pueden utilizar para tener productos con calidad, seguros y eficaces.	
Diagnóstico actual	Las empresas farmacéuticas deben garantizar la dosificación adecuada del activo de cada fármaco ya que de este depende la dosis a cada paciente y el efecto farmacológico en él. Por ende, todos sus procesos deben ser	

supervisados con el fin de cumplir con las especificaciones farmacéuticas del producto, por eso, se hace necesario establecer los parámetros en cada proceso que debe contemplar la empresa farmacéutica para asegurar la calidad de sus productos.

Metodología / técnica		Metodología analítica	
Actividades realizadas		Resultados positivos	
1	Análisis e integración de normativa pertinente.	1	Productos seguros y eficaces.
2	Identificación de operaciones y decisiones influyentes en el control de calidad.	2	Productos a precios justos.
3	Identificación de control de procesos en puntos críticos de la manufactura.	3	Confiabilidad en la empresa por cumplimiento de normativa regulatoria de calidad.
4	Determinación de especificaciones técnicas del producto terminado.	4	Identificación de mejoras en procesos, técnicas, herramientas.
5	Análisis de metodologías analíticas para el control de calidad.	5	Incrementa eficacia, productividad y competitividad
6	Validación de proceso de control de calidad.	6	Capacidad preventiva frente a riesgos de calidad.
		7	Medición de PQRS mediante monitoreo, evaluando la calidad del producto y servicio.

En la Tabla 8 se puede apreciar la información de registro del caso de estudio de una farmacéutica anónima en Colombia que relaciona la integración de la gestión de la calidad desde el diseño.

Tabla 8. Bitácora de registro: Anónima C, Colombia

Nombre de la investigación	La calidad desde el diseño: Principios y oportunidades para la industria farmacéutica		
Autor	Oscar Fabián García Aponte, Bibiana Vallejo Díaz, Claudia Elizabeth Mora Huertas		
Disponible en	https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0123592314001867?token=2740881EDD35DEE605C9839F9DBD0AEB8D2B3192A5A1F90B38EB3C8B7B4905E9868115FD5F1B9E539685CFB82B23BF3C&originRegion=us-east-1&originCreation=20220311015906	Año	2015
Institución de investigación	Universidad Nacional de Colombia		
Institución farmacéutica en estudio	Anónima		
País/ciudad	Colombia	Palabras Clave	Calidad desde el diseño, Industria farmacéutica, Gestión de la calidad
Objetivo general	Explicar la importancia de la nueva visión de la calidad como una estrategia que genera confianza en clientes, industria y organismos reguladores, respecto a la calidad de los productos farmacéuticos.		
Diagnóstico actual	La consolidación de la gestión del conocimiento como un factor determinante en la competitividad de las industrias del mundo globalizado ha cuestionado sus paradigmas acerca de la implementación de los conceptos de aseguramiento de la calidad, desarrollo de productividad, y su apropiación en una compañía ha constituido una característica diferenciadora y generadora de ventajas competitivas. Para el caso de la industria farmacéutica, la gestión del conocimiento ha significado la evolución desde la calidad por ensayo (Quality by Test [QbT]) a la calidad desde el diseño (Quality by Design [QbD])		
Metodología / técnica	Quality by design		
Actividades realizadas		Resultados Positivos	
1	Análisis de la historia y contexto de la desde el diseño.	1	Confiabilidad en la empresa frente a clientes y organismos reguladores de calidad.
2	Relacionamiento de la calidad desde el diseño en el sector farmacéutico.	2	Incrementa eficacia, productividad y competitividad (ventaja competitiva)
3	Etapa de identificación de objetivos	3	Mayor asertividad en la gestión del riesgo.
4	Etapa de establecimiento de los requerimientos	4	Mayor garantía de seguridad sanitaria.
5	Etapa de articulación del proceso		
6	Consolidación de la calidad desde el diseño y mejora continua		
7	Identificación de los efectos de la calidad desde el diseño		

En la Tabla 9 se relaciona la información correspondiente a la bitácora de registro de una investigación que diseñó un manual de requisitos como guía hacia el cumplimiento de factores de calidad de los medicamentos.

Tabla 9 Bitácora de registro: Anónima D, Ecuador

Nombre de la investigación	Diseño de un manual de requisitos básicos para el análisis y control de calidad de medicamentos		
Autor	Gabriela Mishel Jiménez Mendoza		
Disponible en	http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/17542/1/E-10464_JIMENEZ%20MENDOZA%20GABRIELA%20MISHEL.pdf	Año	2021
Institución de investigación	Universidad Técnica de Machala		

Institución farmacéutica en estudio			
País/ciudad	Ecuador	Palabras clave	Requisitos básicos, análisis y control de calidad, medicamentos, etiquetado correcto, validación de procesos.
Objetivo general	Diseñar un manual de requisitos básicos para el análisis y control de calidad de los medicamentos basados en las normas ISO 9001:2000.		
Diagnóstico actual	Para obtener la eficacia del fármaco se debe establecer un sistema el cual nos garantice que los estándares establecidos de su fabricación hayan sido seguidos rigurosamente y así obtener una calidad requerida de dichos medicamentos, teniendo las normas establecidas para cumplirlas estrictamente, se realizan controles de productos terminados, pero a pesar de ello hay incidencias que se presentan en cada etapa del proceso de elaboración.		
Metodología / técnica	Manual de requisitos básicos		
	Actividades realizadas		Resultados Positivos
1	Muestreo de control de calidad.	1	Incremento en la confiabilidad y eficacia de los procedimientos.
2	Investigación e identificación de registros, revisiones, controles, características de cumplimiento y normatividad de cumplimiento en el sector farmacéutico.	2	Cumplimiento a la normatividad, para mayor credibilidad
3	Definición de los requisitos y estándares básicos de cumplimiento.	3	Mayor asertividad en la gestión del riesgo.
4	Estructuración del documento (manual)	4	Mayor garantía de seguridad sanitaria.

En la Tabla 10 se relaciona la bitácora de registro de una investigación colombiana sobre el mejoramiento de la producción y su calidad en medianas empresas dentro de una muestra de 6 empresas farmacéuticas.

Tabla 10. Bitácora de registro: Medianas empresas, Colombia

Nombre de la investigación	Propuesta de mejora de los procesos productivos para medianas empresas basado en las buenas prácticas del sector farmacéutico		
Autor	Gladys Inés Galvis Morales, Melissa Torrado Jácome		
Disponible en	https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1485&context=maest_administracion		Año 2016
Institución de investigación	Universidad de la Salle		
Institución farmacéutica en estudio	6 medianas empresas farmacéuticas		
País/Ciudad	Colombia	Palabras clave	Procesos productivos, Mejoramiento de procesos, sector farmacéutico, buenas prácticas.
Objetivo general	Identificar las fases o elementos de los procesos productivos de la industria farmacéutica, comparar la información de procesos productivos recopilada para medianas y grandes empresas y establecer una propuesta de mejora para procesos productivos en las medianas empresas		
Diagnóstico actual	Funcionalmente la industria farmacéutica cuenta con una estructura general para procesos productivos; sin embargo, existen elementos de diferenciación basados en la calidad que le permitan a las grandes empresas obtener los resultados que las medianas empresas no logran, disminuyendo el nivel de competitividad de las medianas empresas dentro del mercado.		
Metodología / técnica	Diseño e implementación de un instrumento de validación de actividades.		
	Actividades realizadas		Resultados Positivos
1	Reconocimiento de los marcos conceptuales para la contextualización de la temática.	1	Facilita un seguimiento y control del cumplimiento
2	Caracterización de las empresas de estudio y el sector farmacéutico	2	Incrementa eficiencia y flexibilidad de los procesos productivos.
3	Análisis elementos diferenciadores entre grandes y medianas empresa	3	Mayor asertividad en la gestión del riesgo.
4	Evaluación de las etapas de los procesos farmacéuticos de las medianas empresas	4	Mayor organización de la información administrativa y la ejecución.
5	Relacionamiento de actividades por etapa bajo los indicadores de cumplimiento, responsable y chequeo de cumplimiento.	5	Resalta las oportunidades de mejora para obtener mayor competitividad en el mercado frente a las grandes empresas.
6	Propuesta de plan para las buenas prácticas farmacéuticas		

Con lo anterior, se realizó un análisis de factores semejantes entre los casos de estudio generando así criterios de orden que contemplan los factores más influyentes para empresas del sector farmacéutico, para el análisis se desarrolló un informe técnico con los resultados obtenidos, el cual recopila información de objetivos anteriores con el fin de sintetizar todos los resultados y generar una exposición escrita de carácter informativo con la información de mayor relevancia.

Para el análisis comparativo se realizó la presentación de los casos de estudio de manera conjunta, con una comparación global según determinados aspectos como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 . Presentación de casos de estudio

Empresa	Año	País	Objetivo	Metodología / técnica
Tracerlab s.a.s	2019	Colombia	Mejorar el Sistema de Gestión de Calidad de Radio farmacia Tracerlab, basados en los requerimientos de la norma ISO 9001:2015, que permitirá fortalecer la operación de todos los procesos, obteniendo una mejor perspectiva del cliente.	Análisis con herramientas PESTAL Y DOFA, y actualización ISO 9001: 2015
Bayer ag (china)	2016	España	Poner en marcha los análisis del sistema de gestión en la empresa del sector farmacéutico, a través del análisis de la situación en la que se aplica Lean Management dentro de una organización, para intentar concluir y deducir la situación general dentro de la industria farmacéutica si se utiliza el sistema Lean.	Lean Management
Anónimo	2017	Cuba	Lograr una posición más competitiva en el mercado ganando una imagen acompañada de la confianza de los clientes y las partes interesadas basado en normas internacionales como la ISO 9001 de calidad, la ISO 14001 de medio ambiente y la OSHAS 18001 de seguridad y salud.	Basados en normas ISO 9001 de calidad, la ISO 14001 de medio ambiente y la OSHAS 18001 de seguridad y salud.
Medifarma s.a.	2018	Perú	Construir la calidad del producto final, controlando atributos críticos de calidad de los productos intermedios en el mismo proceso aplicando la Tecnología Analítica de Procesos (PAT).	Evaluación de procesos de fabricación con carácter experimental.
Anónimo	2015	Ecuador	Dar a conocer la importancia del Control de Calidad en la Industria Farmacéutica con la finalidad de establecer los lineamientos y las diferentes normativas que se pueden utilizar para poder tener productos con calidad, seguros y eficaces.	Metodología Analítica
Anónimo	2015	Colombia	Explicar la importancia de la nueva visión de la calidad como una estrategia que genera confianza en clientes, industria y organismos reguladores, respecto a la calidad de los productos farmacéuticos.	Quality by Design
Anónimo	2021	Ecuador	Diseñar un manual de requisitos básicos para el análisis y control de calidad de los medicamentos basados en las normas ISO 9001:2000	Manual de requisitos básicos
Medianas empresas	2016	Colombia	Identificar las fases o elementos de los procesos productivos de la industria farmacéutica, comparar la información de procesos productivos recopilada para medianas y grandes empresas y establecer una propuesta de mejora para procesos productivos en las medianas empresas	Instrumento de validación de actividades

A partir de la lectura de los casos de éxito se identificaron los principales resultados logrados con la implementación de procesos para la gestión de calidad:

- **Asertividad Empresarial:** Sistema de dirección y gestión basado en habilidades sociales como la buena comunicación, la decisión, el liderazgo, la confianza, el autoconocimiento y la seguridad.
- **Rentabilidad:** Todo provecho, utilidad o ventaja que pueda ser representada monetariamente.
- **Competitividad:** Generar ventajas frente a la competencia en el mercado.
- **Confiabilidad:** Generar confianza en que un producto no represente un riesgo y cumpla con una función esperada.
- **Coordinación Organizacional:** Que la estructura organizacional se encuentre sincronizada al cumplimiento del mismo plan estratégico.
- **Credibilidad:** La creencia de los clientes y consumidores en que la compañía actúa con la verdad y transparencia.
- **Eficiencia:** La capacidad de cumplir con los objetivos y metas con los mismos o menos recursos.
- **Normatividad:** Son los procedimientos y/o reglamentos que se establecen para determinada gestión y son sometidos por un ente controlador.
- **Prevención:** Acciones oportunas que reducen la probabilidad de ocurrencia de un riesgo o consecuencia negativa.
- **Seguridad Sanitaria:** Aspecto que busca prevenir, mitigar, controlar o eliminar un evento que origine riesgos que afecten la salud de la población.

Con los resultados señalados por las empresas, se construyó un comparativo organizando los beneficios de 1 a 5, donde 5 es el resultado que mayor impacto logró en la empresa y 1 el que menos se vio reflejado con la implementación de los procesos de gestión de calidad.

Finalmente, se realizó la sumatoria de la posición de cada resultado como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Comparativo Factores determinantes para la implementación de SGC

Resultado	Farmacéutica								
	Tracerlab	Bayer	Anónima a	Medifarma	Anónima b	Anónima c	Anónima d	Medianas empresas	Total
Asertividad empresarial			1	1				2	4
Rentabilidad		5		2	2				9
Competitividad		4	5			5		5	19
Confiabilidad	3			3	5	3	3		17
Coordinación organizacional	2	1						3	6
Credibilidad			4				2		6
Eficiencia	1	3	3	5		4	5	4	25
Normatividad	5		2		4		4		15
Prevención		2			1	2		1	6
Seguridad sanitaria	4			4	3	1	1		13

4. DISCUSIÓN

Esta investigación se realizó con el objetivo de determinar los procesos implementados en la gestión de la calidad, a partir del análisis de resultados de los estudios de caso que se encontraron en la literatura. En el análisis comparativo para lograr este objetivo se estudiaron los procesos de éxito implementados, los beneficios obtenidos de la implementación y los factores más relevantes para la implementación de los procesos de la gestión de la calidad, esto en todos los casos de estudio en las empresas farmacéuticas.

En cuanto a los procesos de éxito implementados se encontró que las empresas farmacéuticas siguen una serie de pasos para la gestión de la calidad, iniciando desde el análisis y la evaluación actual, seguido de la aplicación de instrumentos de validación sobre el cumplimiento de la normatividad internacional, también se identifican las falencias y se determina el efecto causa-consecuencia.

Adicionalmente se integran herramientas de gestión de la calidad, se integran acciones de mejora por área o proceso, se documentan y registran los procesos actuales para identificar las acciones de mejora, se evalúa la gestión documental realizada, se evalúa cualitativa y cuantitativamente la producción, se analizan e investigan casos de referencia para la actualización conforme a la normativa.

Finalmente, se implementan manuales de requisitos de cumplimiento durante la producción para la validación de las buenas prácticas.

Entre los beneficios que se obtienen al implementar los sistemas de gestión de calidad en las empresas farmacéuticas, se encontraron algunos en común como lo son el incremento de la eficacia, productividad y competitividad, se aseguró la confiabilidad de la calidad de los productos, se adquirió un criterio preventivo en las actividades productivas, se redujo la generación de desperdicios, se permitió medir la satisfacción del cliente, se permitió verificar la efectividad de los cambios, aumentó la posibilidad de certificación internacional, todo esto representó una ventaja competitiva y generó confianza en el mercado.

Finalmente, en cuanto a los resultados más relevantes para la implementación de procesos de gestión de calidad en las empresas farmacéuticas, se encontraron unos factores estándar que se comparten en la mayoría de las empresas y son: asertividad empresarial, rentabilidad, competitividad, confiabilidad, coordinación organizacional, credibilidad, eficiencia, normatividad, prevención y la seguridad sanitaria, como se muestra en la Figura 3.

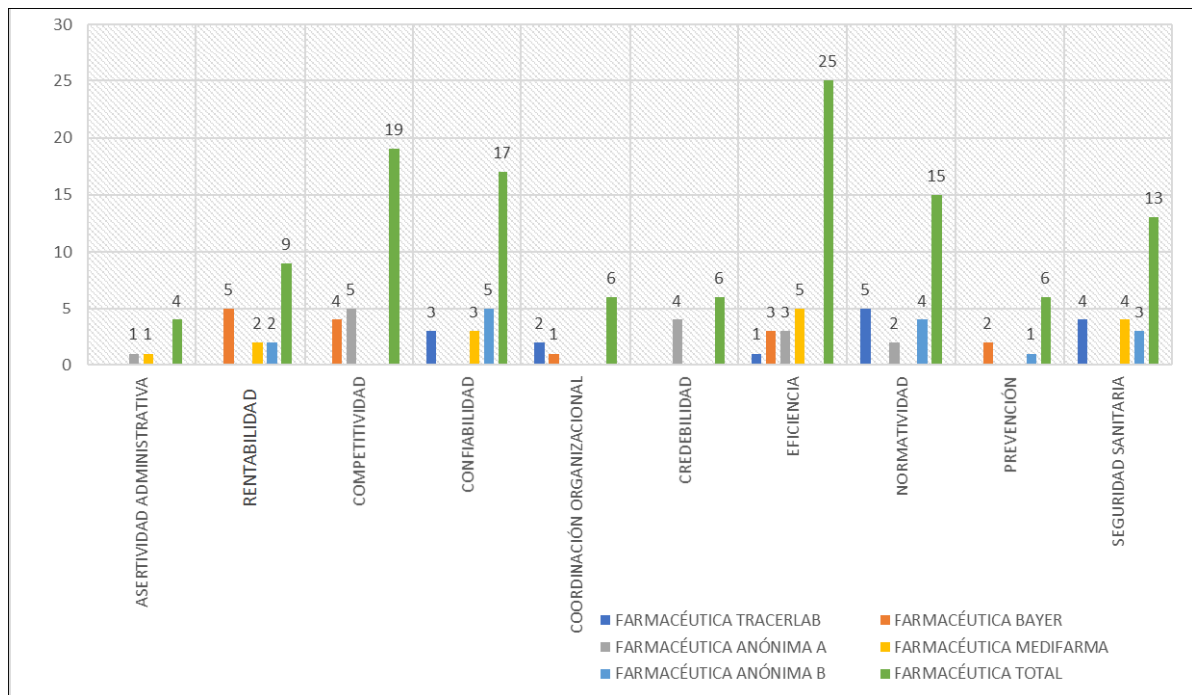


Figura 3. Comparativo de resultados logrado para la implementación de SGC

Para el resultado final de la participación que tuvo cada factor en la relevancia para la implementación de gestión de la calidad en las empresas tomadas como muestra la Figura 4.

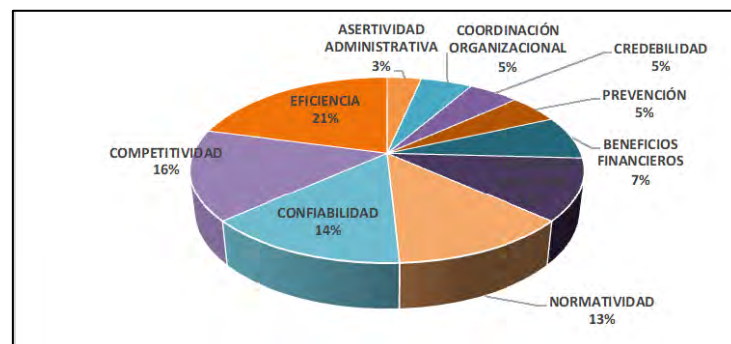


Figura 4. Participación de los factores determinantes en la investigación

5. CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica, se evidenciaron las exigencias de calidad que debe cumplir el sector farmacéutico por su relación directa en el bienestar y seguridad de las personas. Una adecuada gestión de calidad requiere hacer la trazabilidad de la cadena de suministro, transversal a todos los actores, en el aprovisionamiento de insumo, transporte, dosificación, administración y servicios hospitalarios necesarios.

Los principales procesos de éxito implementados para gestionar la calidad en la producción encontrados son: análisis de la gestión de actividades, integración de listas de chequeo, inclusión de la metodología causa-efecto, Lean Management, mejora continua, comparación entre la gestión documentada y la gestión realizada, el análisis de casos de estudio de referencia y, la evaluación cualitativa y cuantitativa de la producción mediante métodos experimentales.

Para gestionar la calidad de una empresa farmacéutica de forma exitosa se debe seleccionar un proceso o una metodología acotada a las necesidades identificadas, los objetivos (beneficios) esperados e incluso los recursos disponibles para tal gestión, dado que no se trata de aplicar metodologías de "moda" o recomendadas sino de analizar el escenario esperado por la organización. También se observó que cada empresa tiene sus diferentes formas de realizar sus procesos. Sin embargo, todas reconocen la necesidad de integrar procesos para gestionar la calidad en la producción, basados en factores como la seguridad

sanitaria, confiabilidad y credibilidad de los consumidores, cumplimiento de la normatividad, beneficios financieros, entre otros.

En la implementación de procesos de gestión de calidad se logran resultados como: eficacia, seguido por la competitividad, generación de confiabilidad, cumplimiento a la normativa y seguridad sanitaria. Estos resultados están asociados a factores determinantes como la mejora interna, las ventajas y el beneficio que representa para la empresa farmacéutica.

La implementación de estos sistemas de gestión de calidad no significan solo esfuerzo, por el contrario, cuanto se hace la correcta y apropiada implementación trae consigo múltiples beneficios, entre los casos de estudio se destacan: el incremento de la eficacia, productividad y competitividad en el mercado, mayor porcentaje de riesgos en la salud y el medio ambiente, mayor confiabilidad en los productos, reducción de desperdicios, mejora continua y menores acciones correctivas, lo que concluye en un beneficio semejante que es el crecimiento financiero.

REFERENCIAS

- [1] Coneo M. (2021). Las compañías farmacéuticas registraron crecimiento de 26,8 % durante la pandemia. Diario de La República. Recuperado: <https://www.larepublica.co/especiales/las-1000-empresas-mas-grandes-de-2020/las-empresas-farmaceuticas-mas-grandes-y-que-mas-vendieron-en-2020-3187887>
- [2] INFAIMON. (2017). Control de calidad y procesos de optimización en la industria farmacéutica. Revolución Artificial. Recuperado: <https://blog.infaimon.com/control-calidad-procesos-optimización-industria-farmacéutica/>
- [3] OMS. (2021). Acerca de la OMS. Organización Mundial de la Salud.
- [4] Aristizábal L. (2019). Integración de la gestión de la calidad con las buenas prácticas de manufactura en tres empresas farmacéuticas de inyectables en Bogotá. Investigación en Sistemas de Gestión.
- [5] América U. (2018). Universidad de América. Recuperado: <http://www.uamerica.edu.co>
- [6] Córdoba I. (2017). Dilemas éticos en las relaciones entre la industria farmacéutica y los profesionales de la salud. Recuperado: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-31222007000100003
- [7] Nuñez M. y Navarro C. (2020). Los fármacos son hoy la tercera causa de muerte. Cuerpomente.
- [8] ISO. (2018). ISO 31000. Gestión del riesgo: Directrices. Recuperado: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:es>
- [9] Colombia Productiva. (2019). Ventas de la industria farmacéutica en Colombia tienen potencial para crecer al menos cuatro veces a 2032. Recuperado: <https://www.colombiaproductiva.com/ptp-comunica/noticias/ventas-de-la-industria-farmaceutica-en-colombia-ti>
- [10] ONU. (2021). Salud, desarrollo sostenible. Organización de Naciones Unidas.
- [11] Lopera J. et al. (2012). El método analítico como método natural. Critical Journal of Social and Juridical Sciences.

Definición de método de priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento para contextos universitarios

Andrea Michelle Gómez¹
Giacomo Barbieri²
Luis Mario Mateus³
Yenny Jazmín Vanegas⁴
Gerardo Andrés Casas⁵
Universidad de los Andes
Colombia

Las organizaciones tienen diferentes formas de generar y priorizar los trabajos para el mantenimiento de toda su infraestructura y de las áreas de producción. La identificación del tipo de trabajo y su aprobación constituyen la primera etapa en la generación de la solicitud de la orden de trabajo. Una vez generadas las solicitudes, estas se deben analizar y asignar una prioridad de ejecución. Aunque existen muchos métodos de priorización de solicitudes de trabajos utilizados en contextos empresariales, no se encuentran aplicaciones de estos métodos a nivel de gestión del mantenimiento de campus e infraestructuras universitarias. En este capítulo se muestra la definición de un método de priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento que se ajusta a los objetivos y al contexto de universidades. El método propuesto se basa en la técnica cualitativa del análisis de criticidad del flujograma y permite clasificar las solicitudes de trabajos de mantenimiento en cuatro categorías de acuerdo a la prioridad asignada. Además, el método se complementa con dos herramientas para facilitar su implementación: una encuesta para la generación de solicitudes de trabajos de mantenimiento y una interfaz para la priorización semiautomática de estas. En el contenido se demuestra cómo este trabajo representa un caso de éxito que puede ser útil e inspirar a empresas e instituciones educativas y utilizarse en la educación en gestión del mantenimiento ya que aplica varios principios de esta disciplina.

¹ Ingeniera Mecánica.

Contacto: am.gomezg@uniandes.edu.co

² Doctor en Ingeniería de la innovación industrial.

Contacto: g.barbieri@uniandes.edu.co

³ Magíster en ingeniería mecánica.

Contacto: lmateus@uniandes.edu.co

⁴ Magíster en Sostenibilidad y eficiencia energética

Contacto: yvanegas@uniandes.edu.co

⁵ Magíster en Construcción.

Contacto: ga.casas54@uniandes.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La *gestión del mantenimiento* es el proceso que incluye todas las actividades de gestión que determinan los requisitos, objetivos, estrategias y responsabilidades del mantenimiento, y su implementación por medio de la planificación, control y mejora de las tareas y de los costos de este [1]. Este conjunto de actividades tiene como propósito generar valor a la empresa a través del equilibrio entre costo, riesgo y desempeño. Una de estas es la gestión de trabajos de mantenimiento.

La *gestión de trabajos* de mantenimiento se encarga de la ejecución de los trabajos de mantenimiento. Además, se asegura que estos sean efectuados por personas debidamente capacitadas y calificadas, con los materiales necesarios, según los procedimientos establecidos y en el momento apropiado, reduciendo así el desperdicio de tiempo y de recursos humanos y materiales. En una empresa estructurada y que tiene un cierto nivel de madurez con respecto a la gestión del mantenimiento, el proceso de gestión del trabajo suele manejarse en la forma representada en Figura 1.



Figura 1. Proceso de gestión de trabajos de mantenimiento [2]

La etapa de *identificación y aprobación* es caracterizada por la definición de solicitudes de trabajos de mantenimiento y por su aprobación. Estas pueden ser creadas por parte de operadores o por el personal de mantenimiento que se da cuenta de fallas que se inician durante la ejecución de trabajos. Además, un software de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador GMAO puede generar las solicitudes de forma automática emitiendo avisos de que es necesario ejecutar tareas preventivas del plan de mantenimiento.

Las solicitudes y los avisos se suelen analizar, validar y aprobar. Además, se definen prioridades de ejecución. Cuanto más alto es el nivel de desgaste y la consecuencia de una eventual falla, más prioritaria tendrá que ser la ejecución del trabajo [3]. Es importante que quien defina las prioridades no sea la misma persona que solicita el trabajo ya que seguramente para él su necesidad siempre será prioritaria.

Existen varios métodos para la *priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento*, como el proceso de jerarquía analítica, el criterio de prioridad, las matrices de prioridades, y métodos que consideran el modo de falla y el análisis de los efectos generados por esta [4]. Estos métodos toman en consideración factores técnicos, financieros y organizacionales entre otros. Sin embargo, en el ámbito de la priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento es de gran importancia definir un método que se ajuste a los objetivos organizacionales y al contexto de la empresa.

A pesar de la gran variedad de métodos de priorización de solicitudes de trabajos utilizados en contextos empresariales [4], los autores no han encontrado aplicaciones de estos a nivel de gestión del mantenimiento de campus e infraestructura universitaria. Aunque las *universidades* pueden considerarse como empresas que manejan activos físicos (p.ej. equipos de laboratorio, talleres, infraestructura, etc.) y proveen servicios principalmente relacionados a la docencia y la investigación, la aplicación de los principios y herramientas de la gestión del mantenimiento tiene que adaptarse a un contexto diferente a la de una empresa tradicional.

En particular, los activos (como los equipos de laboratorio) son caracterizados por bajas tasas de utilización [5], y la generación de valor no está relacionada a la utilidad consecuente a la venta de un producto sino de servicios; p.ej. docencia, investigación y servicios a empresas cuales consultorías. Por lo tanto, la definición de un método de priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento que se ajuste a los objetivos y al contexto de universidades resulta interesante y podría ser de ayuda para otras instituciones educativas.

A partir de lo presentado anteriormente, este trabajo propone un *método de priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento para contextos de universidades*. Este método utiliza una técnica cualitativa de análisis de criticidad, la técnica del flujograma [6], para priorizar las solicitudes de trabajos de mantenimiento recibidas por la Jefatura de Mantenimiento e Infraestructura de Gerencia del Campus de la Universidad de Los Andes, Colombia.

El método propuesto aplica para las solicitudes de trabajos menores de mantenimientos correctivos, ya que emergencias y urgencias son gestionadas a través de un proceso diferente. La Universidad de los Andes es una institución de educación superior cuyo campus cuenta con más de 85 edificios que ocupan diversas instalaciones (p.ej. laboratorios, talleres, salones, oficinas, etc.) y que genera un promedio de 70 solicitudes de trabajos menores de mantenimiento por día. Por lo tanto, resulta fundamental tener un método para priorizar la ejecución de las diferentes solicitudes de mantenimiento. Cabe aclarar que el método propuesto está en vía de validación, con posibles ajustes, para su implementación dentro de los procesos de la universidad. Sin embargo, el ejercicio mostrado en este trabajo podría ser útil para otras empresas e instituciones educativas.

2. MARCO CONTEXTUAL

2.1 Técnica de análisis de criticidad del flujograma

Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten jerarquizar por su importancia los activos de una empresa para facilitar la toma de decisiones. Estas técnicas se aplican en las diversas funciones de la gestión del mantenimiento y en este trabajo lo los autores proponen el uso de estas para la priorización de las solicitudes de trabajos de mantenimiento.

Existen diferentes tipologías de métodos de análisis de criticidad que se suelen dividir en cuantitativas, semicuantitativas y cualitativas. Cabe aclarar que la aplicación de métodos cuantitativos implica un alto nivel de madurez de la empresa y el uso de recursos para el proceso de cuantificación. Se suele escoger el método más apropiado (en términos de complejidad) según el impacto de la decisión que se quiere tomar a través del análisis de criticidad. Considerando que el método ilustrado en este capítulo no tendrá que gestionar solicitudes de trabajos de emergencia o urgencia, los autores decidieron utilizar un método cualitativo.

En esta sección se presenta la técnica cualitativa de análisis de criticidad del flujograma. En particular, en la sección 2.1 se encuentra el flujo de trabajo para la implementación de técnicas de análisis de criticidad, mientras que en la sección 2.2 se ilustra la técnica del flujograma. Este material es adaptado de [6].

2.1.1 Flujo de trabajo para el análisis de criticidad

Antes de implementar un análisis de criticidad es importante seguir el flujo de trabajo representado en la Figura 2 para que, posteriormente el análisis, permita jerarquizar correctamente los elementos según el problema que se está considerando.



Figura 2. Flujo de trabajo para el análisis de criticidad.

El flujo de trabajo consta de las siguientes fases:

1. *Definición del alcance*: un análisis de criticidad se puede implementar para tomar diferentes tipologías de decisiones. Por ejemplo, a nivel de activos se puede usar para identificar cuáles activos podría valer la pena renovar o en cuáles se sugiere revisar el plan de mantenimiento a través de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad. Mientras que a nivel de ítems mantenibles se podría utilizar para definir en cuáles se tendría que implementar un análisis causa raíz para eliminar la ocurrencia de

ciertos modos de falla. Se puede intuir que en esta fase se necesita establecer la decisión que se quiere tomar y a cuál nivel de la taxonomía de los activos se tiene que aplicar el análisis. En el contexto de este trabajo, la decisión que se tomará no involucrará activos sino solicitudes de trabajos de mantenimiento.

2. *Selección de criterios:* según el alcance establecido, se necesita definir los criterios que se usarán para jerarquizar los elementos estudiados. En el caso de activos, algunos ejemplos de estos criterios son: flexibilidad operacional (disponibilidad de un elemento alternativo o de respaldo), efecto de la falla del elemento en la producción, en la calidad del producto o en la seguridad o medio ambiente, costos de paradas y del mantenimiento, frecuencia de fallas y entre otras.
3. *Identificación del método de evaluación:* una vez definidos los criterios, se tendrá que identificar un modelo que permita tomar decisiones según el valor adquirido por el elemento en cada criterio. Existen métodos de evaluación cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos.

2.1.2 Método del flujograma

El método del flujograma constituye una técnica puramente cualitativa. Como se puede observar en la Figura 3, el resultado del proceso es una clasificación de los elementos analizados en tres categorías: A, B y C; siendo los elementos tipo A los más críticos.

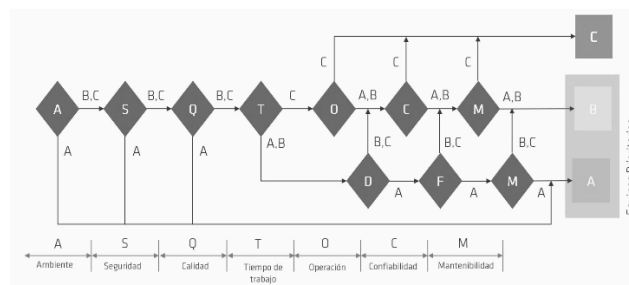


Figura 3. Análisis de criticidad basada en el método del flujograma

Para llegar a esa clasificación se procede de forma secuencial analizando el elemento con respecto a cada criterio. La secuencia de los criterios marca la importancia que da el equipo de trabajo a cada criterio a la hora de establecer la criticidad de los elementos. Adicionalmente, el orden en la secuencia marca el peso que se le atribuye a cada criterio.

Para cada criterio existen tres niveles posibles A, B y C que sirven para caracterizar el elemento. Algunos ejemplos de niveles están representados en Figura 4. Cabe aclarar que la empresa que quiera aplicar este método tendrá que definir los criterios importantes para el análisis, su prioridad (el flujograma) y los niveles para cada criterio.

Evaluación / Criterio	Ambiente (A)	Seguridad (S)	Calidad (Q)	Tiempo de trabajo (T)	Operación (O)	Confiabilidad (C)	Mantenibilidad (M)
A	El fallo del elemento puede provocar que la empresa tenga que recurrir a dar aviso a las autoridades públicas por problemas que pudiesen afectar el medio ambiente	El fallo del elemento puede producir accidentes que provocan absentismo laboral o permanente en el lugar de trabajo	El fallo del elemento tiene consecuencias en la calidad del producto y esto puede producir un importante impacto externo; es decir, una imagen muy negativa de la compañía en el mercado	El elemento trabaja a tres turnos	El fallo del elemento puede producir un paro en toda la fábrica	El elemento tiene un tiempo promedio operativo menor a 500 horas	El elemento tiene un tiempo promedio fuera de servicio superior a 90 minutos
B	El fallo del elemento puede provocar una contaminación que pudiera gestionarse en el interior de la empresa	El fallo del elemento puede causar daños menores a la gente en el trabajo; ósea no producen la ausencia del trabajo	El fallo del elemento tiene consecuencias en la calidad del producto y esto puede producir un impacto interno (a la empresa)	El elemento trabaja a dos turnos	El fallo del elemento puede producir un paro de una sola línea de producción	El elemento tiene un tiempo promedio operativo entre 500 y 1000 horas	El elemento tiene un tiempo promedio fuera de servicio entre 45 y 90 minutos
C	El fallo del elemento no produce ningún tipo de contaminación medioambiental	El fallo no genera consecuencias relacionadas con la seguridad de las personas	El fallo del elemento no tiene consecuencias en la calidad del producto	El elemento trabaja a un turno	El fallo del elemento no produce una afectación significativa de la producción	El elemento tiene un tiempo promedio operativo superior a 500 horas	El elemento tiene un tiempo promedio fuera de servicio inferior a 45 minutos

Figura 4. Ejemplo de niveles para los criterios representados en Figura 3

3. MÉTODO

Esta sección ilustra el método de priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento para contextos de universidades resultante de un ejercicio con la Jefatura de Mantenimiento e Infraestructura de Gerencia del Campus de la Universidad de los Andes.

3.1 Definición del alcance

En esta etapa se necesita definir la decisión que se quiere tomar y a cuáles elementos se tiene que aplicar el análisis. En este contexto, el primer paso fue definir la *tipología de solicitudes de trabajos* de mantenimiento para las cuales tendría que aplicar el método propuesto. Por esto, se definió que el método debía priorizar solamente solicitudes de trabajos menores de mantenimientos correctivos; es decir, que no constituyen emergencias o urgencias.

En la universidad, una *emergencia* se define como la ocurrencia de modos de falla que podrían herir u ocasionar la muerte a una persona o infringir alguna norma o regulación ambiental. En esta categoría entran también fallas que podrían determinar graves daños en activos críticos. Mientras que una *urgencia* se refiere a modos de falla que determinan inconvenientes mayores en el servicio ofrecido por la universidad o a situaciones que, si bien no constituyen una emergencia, requieren de una atención inmediata.

Las emergencias y urgencias son atendidas a través de una línea telefónica con respuesta inmediata y, por ende, no pasan por el proceso estándar de solicitud de trabajos de mantenimiento. Según esto, el alcance del método de priorización presentado en este trabajo se enfoca en aquellas solicitudes de carácter correctivo, pero que no se categorizan como emergencias o urgencias.

La universidad recibe cerca de 70 solicitudes de trabajos diarias, las cuales son revisadas por un auxiliar administrativo y después asignadas a los coordinadores de mantenimiento. En el ejercicio de determinación del alcance, se definió que el método de priorización debía clasificar las solicitudes de trabajo en *cuatro categorías*, cada una asociada a un plazo máximo de ejecución:

- *Categoría A*: plazo de ejecución de 5 días
- *Categoría B*: plazo de ejecución de 12 días
- *Categoría C*: plazo de ejecución de 30 días
- *Categoría D*: plazo de ejecución de 60 días

Los plazos definidos tuvieron en cuenta los tiempos de procesos administrativos y los recursos y el personal disponible en la universidad para la ejecución del trabajo. Por ejemplo, ninguna solicitud podría ser finalizada en un día, ya que su registro administrativo toma este tiempo. Además, debido al alto volumen de solicitudes de trabajo recibidas por día, no sería realista comprometerse con una respuesta inferior a dos días. Finalmente, se definió que el método desarrollado debía contar con dos *herramientas* para facilitar su implementación: 1) una encuesta para la generación de solicitudes de trabajos de mantenimiento; y 2) una aplicación para permitir fácilmente al auxiliar administrativo priorizar las solicitudes recibidas.

3.2 Selección de criterios

A partir del alcance establecido, en esta etapa se necesita definir los criterios que se usarán para jerarquizar las solicitudes de trabajo. Este proceso tiene que alinearse con el modelo de valor de la empresa y el alcance del análisis. En este ejercicio, se decidió priorizar las fallas que tienen un impacto en la docencia con respecto a las que tienen consecuencias en la investigación y la consultoría. Además, se dio más importancia a fallas que afectan la prestación de servicios de la universidad con respecto a las que a largo plazo podrían tener un impacto en la Seguridad e Higiene Ocupacional y Medio Ambiente.

Esto se decidió considerando que si la falla con posibles consecuencias en la seguridad y ambiente fuera incipiente (o ya hubiera ocurrido) se habría tratado como emergencia y no como mantenimiento correctivo menor. Sin embargo, estos supuestos habría que validarlos con la alta dirección antes de aplicar el método

propuesto en este trabajo dentro del proceso de priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento de la universidad. A partir de lo anterior se definieron los siguientes criterios:

1. *Servicio*: contempla los servicios que la universidad provee a sus usuarios y cómo estos estarían en riesgo frente a una avería dada.
2. *Especialidad*: contempla el grado de indisponibilidad que la avería causa en el espacio específico considerado.
3. *Seguridad y ambiente*: contempla fallas que a largo plazo podrían tener un impacto en la seguridad, la higiene ocupacional y el medio ambiente.

La primera categoría consiste en el análisis de afectación de los *servicios* proporcionados por la universidad. En la Figura 5 se muestran los diferentes niveles de criticidad establecidos para este criterio. Para la universidad es de suma importancia asegurar que sus estudiantes puedan realizar sus actividades académicas sin inconvenientes. Debido a esto, los espacios donde estas se realizan resultan ser los más críticos, como los salones de clase, salas de estudio, bibliotecas, auditorios, etc.

Riesgo Servicio	
A	Se ven afectados espacios académicos. Ej: salones.
B	Se ve afectada la infraestructura técnica. Ej: baños, ascensores.
C	Se ven afectados espacios de investigación y apoyo a docencia. Ej: Talleres, laboratorios.
D	Se ven afectados espacios de administración y exteriores. Ej: Oficinas, circulación.

Figura 5. Criterio de riesgo al servicio y sus niveles de criticidad asociados

Después de esto, los espacios que compondrían el siguiente nivel de importancia serían infraestructuras hidrosanitarias y de carácter técnico, debido a que son espacios de uso constante que proveen a los usuarios de la universidad facilidades esenciales. Dentro de estos se contemplarían baños, duchas, redes de agua, ascensores, escaleras eléctricas, etc. Tras esta, se tienen en cuenta la relevancia del desarrollo de investigación y apoyo a docencia dentro de la universidad. Esto incluye laboratorios, talleres, consultorios y demás espacios donde se realicen este tipo de actividades. En el cuarto lugar, se consideran aquellos espacios que, si bien cumplen una función dentro de la universidad, no son el núcleo de esta misma; p.ej. espacios de administración, exteriores, etc.

La segunda categoría de criterios de priorización está ligada a los riesgos asociados a la *especialidad*. En esta categoría, se tiene en cuenta qué grado de indisponibilidad la avería causa en el espacio. En otras palabras, con qué dificultad se pueden realizar las actividades a las cuales está destinado el espacio. Debido a que se están tratando cuatro diferentes servicios (espacios académicos, infraestructuras hidrosanitarias o de carácter técnico, espacios de investigación y apoyo a docencia, y espacios de administración y exteriores), las averías que podrían provocar dificultades en el uso de este espacio varían, precisamente, según estos espacios.

En vista a esto, fue importante determinar cuáles eran aquellas averías que causarían la indisponibilidad del espacio para cada uno de estos. En la Figura 6 se puede observar cada uno de estos, con su respectivo riesgo y componentes comúnmente asociados según su criticidad. Como ejemplo, se puede tomar el caso de los espacios académicos, donde la mayor criticidad se da cuando los componentes que serían indispensables para la realización de actividades académicas se ven comprometidos debido a la avería.

En el caso de un salón de clase, esto podría incluir el incorrecto funcionamiento del video proyector o de tomas eléctricas. No obstante, es relevante notar que los componentes indicados en la imagen son solamente sugerencias, ya que el personal que sea el encargado de definir estas criticidades debe utilizar su experiencia y criterio para poder navegar esta matriz según la situación que se le presente. Por ejemplo, si existen filtraciones o humedades avanzadas en el techo de un salón de clase esto podría llevar a una avería de mayor criticidad. Si bien en el momento la humedad no impide las actividades que se realizan en

el salón, de no tratarse rápidamente esta podría comprometer la integridad del techo, causando repercusiones más graves. Debido a esto, se recalca la relevancia del auxiliar de mantenimiento encargado de dar esta priorización, por lo cual debe ser un miembro del equipo de trabajo que cuente con la experiencia y conozca las situaciones que se pueden presentar dentro de la universidad.

Riesgos de especialidad según servicio								
Espacios académicos		Infraestructuras hidrosanitarias o de carácter técnico		Espacios de investigación y apoyo a docencia		Espacios de administración y exteriores.		
Definición	Componentes comunes	Definición	Componentes comunes	Definición	Componentes comunes	Definición	Componentes comunes	
A	Considerar componentes que serían indispensables para dictar la clase o para que el estudiante pueda estudiar.	Componentes eléctricos: Tomas/video beam	Considerar componentes que comprometan el uso de infraestructuras hidrosanitarias o de carácter técnico.	Componentes hidrosanitarios: falta de agua, fugas, inconvenientes con sistemas de aguas tratadas.	Considerar componentes que son indispensables para que se realicen las actividades de investigación o apoyo a docencia. Esta consideración dependerá del área de conocimiento trabajada.	Componentes eléctricos: tomas, equipos de laboratorio, iluminación.	Considerar componentes que son indispensables para el equipo administrativo. Esto varía según la función de este usuario.	Componentes eléctricos: tomas, equipos.
B	Considerar componentes que dificulten que un profesor dicte la clase o que el estudiante pueda estudiar.	Componentes localivos y eléctricos de segunda prioridad: tablero, sillas, mesas, iluminación.	Considerar componentes que dificulten el uso de infraestructuras hidrosanitarias o de carácter técnico.	Componentes eléctricos: iluminaria, sensores.	Considerar componentes que dificulten la realización de actividades de investigación o apoyo a docencia.	Componentes hidrosanitarios: fugas, filtraciones.	Considerar componentes que dificulten la realización de las actividades del equipo administrativo.	Componentes localivos y eléctricos de segunda prioridad: tablero, sillas, mesas, iluminación.
C	Considerar componentes que serían molestos para dictar la clase o para que el estudiante pueda estudiar.	Componentes hidrosanitarios: fugas, filtraciones, humedades.	Considerar componentes que resulten molestos para el uso de infraestructuras hidrosanitarias o de carácter técnico.	Componentes localivos: mesones, puertas.	Considerar componentes que resulten molestos a la hora de la realización de actividades de investigación o apoyo a docencia.	Componentes localivos: mesones, sillas, mesas, tableros.	Considerar componentes que resulten molestos para la realización de las actividades del equipo administrativo.	Componentes hidrosanitarios: fugas, filtraciones, humedades.
D	Considerar componentes que NO afecte que se dicten las clases o que los estudiantes estudien.	Otros	Considerar componentes que NO afecten el uso de infraestructuras hidrosanitarias o de carácter técnico.	Otros	Considerar componentes que NO afecten la realización de actividades de investigación o apoyo a docencia.	Otros	Considerar componentes que NO afecten la realización de actividades administrativas u otras.	Otros

Figura 6. Criterio de riesgos asociados a la especialidad y sus niveles de criticidad asociados

El último criterio definido está asociado a la *seguridad y ambiente*. En la Figura 7 se muestran los diferentes niveles de criticidad establecidos para este criterio. Esta categoría comprende aquellas averías y situaciones que no son clasificadas como emergencias o urgencias en el momento, pero que tienen potencial de así serlo (a largo plazo), como ya se mencionó anteriormente. Para el desarrollo de estos riesgos se tomó como referencia los criterios manejados por la Federación de Empleados de Servicios UGT en su portal de riesgos laborales de los trabajadores de la enseñanza [7].

Riesgo Seguridad y Ambiente	
A	Existen riesgos no urgentes en la seguridad e integridad del usuario. Ej: lesiones, quemaduras, electrocuciones.
B	Existen riesgos en la higiene para el usuario. Ej: exposiciones contaminantes, exposición a frío o calor, humedades.
C	Existen riesgos en la ergonomía del usuario. Ej: carga física, iluminación, ruido, disconfort.
D	No hay riesgos en la seguridad y salud en el trabajo.

Figura 7. Criterio de riesgos asociados a la seguridad y ambiente y sus niveles de criticidad asociados

En su mayor nivel de criticidad se tienen en cuenta riesgos en la seguridad e integridad del usuario donde hay una capacidad de producirse lesiones, quemaduras y demás. Como ejemplo se podría tener la incorrecta instalación de un televisor con un soporte flotante. Si bien este no pone en peligro la seguridad de personas en el momento, existe la posibilidad de que con el tiempo este se debilite y termine cayéndose, lo cual podría causar una lesión a alguien.

Posteriormente se evalúan riesgos en la higiene para el usuario. Esta incluye la exposición a contaminantes, frío o calor, humedades, etc. Luego, se contemplan riesgos en la ergonomía del usuario. Claramente, trata de situaciones donde el usuario esté expuesto a condiciones de carga física, mala iluminación, ruido constante o cualquier otro tipo de incomodidades.

3.3 Identificación del método de evaluación

Una vez definidos los criterios de evaluación y sus niveles de criticidad, se procede a la construcción del flujograma. En este, la secuencia de los criterios marca la importancia que da el equipo de trabajo a cada

criterio a la hora de establecer la prioridad de los elementos. De alguna forma, el orden en la secuencia marca el peso que se le atribuye a cada criterio. El flujograma implementado está representado en Figura 8. Cabe aclarar que este diagrama está basado en ciertos supuestos (p.ej. una avería con consecuencia en la docencia es más grave que una en el área de investigación, etc.) que habría que validar con los altos directivos antes de aplicar este método dentro del proceso de priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento de la universidad.

Como se muestra en Figura 8, el primer criterio que se evalúa es el servicio. Este se coloca de primer lugar debido a que responde al objetivo y preocupación principal de la universidad: los estudiantes, como se explicó previamente. Luego, se evalúa el criterio de especialidad. Este es el siguiente debido a que toma en cuenta las averías que afectarían el uso del servicio previamente definido. Finalmente, se evalúa el criterio de seguridad y ambiente. Si bien dentro de otros contextos este último criterio suele ser el primero por evaluar, se debe tener en cuenta que, debido al alcance de la herramienta, se excluyen situaciones de urgencia o emergencia y por lo tanto se define como el menos prioritario.

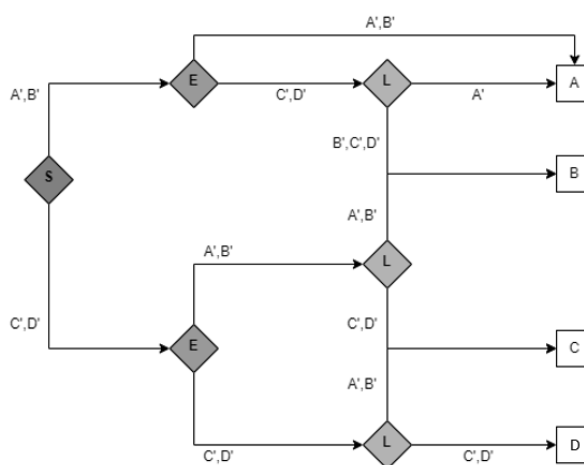


Figura 8. Flujograma para la evaluación de prioridad de solicitudes de trabajos de mantenimiento. En la derecha se encuentran las cuatro categorías de prioridades mientras que la letra S indica el criterio de servicio, E de especialidad y L de seguridad y ambiente. Finalmente, las letras con el símbolo de apóstrofo (p.ej. A') indican la dirección que se tiene que tomar según de la criticidad de la solicitud en un criterio determinado.

El flujograma está pensado para que el auxiliar de mantenimiento revise la solicitud recibida y en seguida conteste a las siguientes preguntas apoyándose en las matrices desarrolladas (Figuras 5, 6 y 7) para identificar el correspondiente nivel de criticidad:

- *Bloque S:* ¿Cuál espacio se ve comprometido por la avería presentada?
- *Bloque E:* ¿A qué grado la avería dificulta la realización de las actividades dentro del espacio dado?
- *Bloque L:* ¿La avería provoca algún riesgo asociado a la seguridad o ambiente?

3.4 Herramientas para la implementación

En la etapa de definición de alcance, se decidió que el método desarrollado debía contar con dos *herramientas* para facilitar su implementación: 1) una encuesta para la generación de solicitudes de trabajos de mantenimiento, y 2) una interfaz para asignar en forma semiautomática las solicitudes recibidas. En esta sección se muestran las dos herramientas diseñadas.

3.4.1 Encuesta para la generación de solicitudes de trabajos de mantenimiento

Una vez definido el proceso de priorización de las solicitudes de trabajos de mantenimiento resulta fundamental tener un formato de solicitud alineado con el proceso; es decir, la información requerida en el formato de solicitud de trabajos de mantenimiento debe permitir al auxiliar de mantenimiento contar con toda la información necesaria para clasificar la categoría de la avería en cada criterio. Además, este formato no solo será útil para la priorización de las ordenes de trabajo, sino que también proveerá información de

valor para facilitar una futura planeación, programación y comunicación con el usuario. A partir del formato de solicitud de trabajos de mantenimiento actualmente utilizado en la universidad y del proceso de priorización desarrollado, se llegó al formato representado en la Tabla 1.

Tabla 1. Representación conceptual del formato de solicitud de trabajos de mantenimiento. En este, se define como usuario directo la persona que requiere el servicio, mientras el usuario indirecto es quien está autorizado para solicitar el trabajo de mantenimiento. Se hace esta distinción ya que la persona que requiere el servicio no siempre coincide con la que tiene los permisos de llenar el formato de solicitud. Por ejemplo, un profesor (usuario directo) podría notar un problema en un salón de clase e informaría la persona responsable (usuario indirecto) para que arme la solicitud y haga seguimiento al caso.

Nombre de campo	Descripción	Tipo de campo
Bloques de información	Bloques de información para guiar e informar al usuario acerca de definiciones necesarias o especificaciones de formato	Informativo
Especialidad	Especialidad del servicio solicitado	Campo de selección única
Edificio	Edificio en el cual ocurrió la avería	
Piso	Edificio en el cual ocurrió la avería	
Nomenclatura del espacio	Espacio: baño, pasillo, oficina, etc.	Campo abierto
Asunto	Descripción breve del problema	
Descripción	Descripción detallada del problema	
Campo de descripción con síntomas asociados al equipo	Descripción detallada del problema y los síntomas identificados	Campo de selección múltiple
Campo de causas probables	De NO conocerse, este campo puede dejarse en blanco	
Selección de consecuencias	Opciones de consecuencias concordantes con los niveles y los criterios del método de priorización desarrollado	
Campo de justificación a consecuencias	Se tiene que explicar porque se seleccionó una determinada consecuencia	Campo abierto
Foto de la avería	El usuario puede incluir una o más fotos de la avería	Archivo
Información del usuario directo e indirecto	Nombre y contacto de ambos tipos de usuarios	Campo de selección única
Tipo de contacto	Email, extensión, etc.	Campo abierto
Campo para contacto	Este campo se utiliza en el caso que la persona que estará pendiente de la reparación sea diferente del usuario directo o indirecto	
Selección de horarios de disponibilidad del espacio	Opciones de disponibilidad para revisiones y reparaciones	Campo de selección múltiple
Selección de usuario responsable de seguimiento	Se solicita que se determine quién será responsable de hacer el seguimiento a la orden. Este será el usuario directo o indirecto o lo que se insertó en el campo de contacto	Campo de selección única

Los campos más relevantes del formato de solicitud:

- *Bloques de información:* estos bloques resultan esenciales para guiar y aclarar dudas que pueda tener el usuario al momento de hacer una solicitud. Por ejemplo, en uno de estos bloques se recuerda qué significa una emergencia y una urgencia y aclara que el formulario aplica solamente para la solicitud de trabajos menores de mantenimiento correctivo.
- *Campo de descripción con síntomas:* este campo tiene como objetivo informar al personal de mantenimiento la situación a tratar. Para esto, es importante incluir síntomas que faciliten la identificación del problema (proceso de diagnóstico) y provean una indicación al coordinador de mantenimiento de las especialidades necesarias para la reparación.
- *Campo de causas probables:* este campo es insertado para tener una mayor claridad sobre la avería en cuestión. En este se da al usuario la posibilidad de indicar una o más causas probables. Sin embargo, estas se determinarán a través de una revisión presencial del técnico asignado al trabajo. Por esta razón, este campo se deja facultativo.
- *Selección de consecuencias:* esta selección permite orientar al auxiliar de mantenimiento al momento de responder las preguntas guías para la priorización de la solicitud de trabajo. También se incluyó un campo de justificación de la consecuencia seleccionada para poder verificar que, efectivamente, las consecuencias estén acorde a la situación descrita. Las opciones de este campo:

- La avería impide la realización de actividades por parte de profesores o estudiantes.
- La avería impide la realización de actividades de investigación y apoyo a docencia.
- La avería impide que el usuario de este espacio (equipo administrativo y demás funciones) pueda continuar con su trabajo.
- La avería impide el uso de alguna infraestructura hidrosanitaria o de carácter técnico esencial para la comunidad.
- La avería significa un riesgo en la integridad/seguridad de alguna persona.
- La avería afecta la presentación/comodidad del espacio donde está.

Cabe aclarar que el usuario puede seleccionar una o más de las consecuencias presentadas.

- *Distinción de usuario directo/indirecto:* esta distinción es de interés ya que actualmente existen varios inconvenientes provocados por una falta de comunicación entre el usuario directo y el equipo de mantenimiento. El usuario directo quien requiere el servicio de mantenimiento y por lo tanto resulta fundamental indicar quien es, en el caso que se requiera información adicional respecto a la que el usuario indirecto subió a la plataforma al momento de la generación de la solicitud.
- *Campo para contacto:* dependiendo del espacio donde ocurra la avería, hay casos en los cuales ni el usuario directo o indirecto sean responsables de estos lugares; p.ej. espacios de circulación, laboratorios, y demás. Estos son supervisados por otros usuarios, por lo cual es necesario solicitar su información.
- *Selección de horarios de disponibilidad:* esta información es importante considerando que el técnico de mantenimiento tendrá que agendar la revisión de la avería y la siguiente reparación.
- *Selección de usuario responsable de seguimiento:* esta información es importante considerando que el técnico de mantenimiento tendrá que comunicarse con la persona responsable del seguimiento de la solicitud para agendar la revisión de la avería y la siguiente reparación.

El formato de solicitud de trabajos de mantenimiento fue desarrollado a través de la plataforma 'Microsoft Forms', la cual autoriza uso exclusivo de miembros de la comunidad de la Universidad de Los Andes y, además, posibilita la gestión de las solicitudes por parte del equipo de mantenimiento a través de sus cuentas oficiales. Una parte de este se encuentra representado en Figura 9.

9. Si cree saber cuál es la causa de la avería, coméntela brevemente. Si no, deje el campo sin responder (máximo 100 caracteres).

Escriba su respuesta

10. Escoja cuál/cuales consecuencias se podrían producir de no tratar la avería. *

La avería impide la realización de actividades por parte de docencia y/o estudiantes.

La avería impide la realización de actividades de investigación y apoyo a docencia.

La avería impide que el usuario de este espacio (equipo administrativo y demás funciones) pueda continuar con su trabajo.

La avería impide el uso de alguna infraestructura hidrosanitaria o de carácter técnico esencial para la comunidad.

La avería significa un riesgo en la integridad/seguridad de alguna persona.

La avería afecta la presentación/comodidad del espacio donde está.

11. Especifique la razón de su selección en la pregunta anterior. (máximo 100 caracteres) *

Escriba su respuesta

Figura 9. Parte de la encuesta desarrollada para la generación de solicitudes de trabajos de mantenimiento

3.4.2 Aplicación para la priorización semiautomática de las solicitudes de trabajos de mantenimiento

Siguiendo el ejemplo indicado en [8], se diseñó una aplicación en Excel que implementa el flujograma ilustrado en Figura 8. La interfaz de la aplicación desarrollada se encuentra representada en Figura 10. En esta, el auxiliar de mantenimiento tiene que insertar la criticidad de la avería para cada criterio y en automático la herramienta provee la prioridad de la solicitud y el plazo de ejecución. En este contexto, los

autores definen la herramienta como semiautomática ya que los niveles de criticidad para cada criterio se tienen que insertar en forma manual.

Complete los siguientes campos	
Riesgos asociados al servicio	Infraestructuras hidrosanitarias o de carácter técnico
Riesgos asociados a la especialidad	Espacios académicos
Riesgos asociados a seguridad y ambiente	Infraestructuras hidrosanitarias o de carácter técnico
	Espacios de investigación
	Espacios de administración y otros
PRIORIDAD	A
PLAZO DE EJECUCIÓN	5 días

Figura 10. Aplicación Excel para la priorización semiautomática de las solicitudes de trabajos de mantenimiento

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

1. *Trabajos menores de mantenimiento correctivo*: el método desarrollado aplica para solicitudes de trabajos de mantenimiento correctivo que no se clasifican como emergencias y urgencias. Para remarcar este concepto y evitar malinterpretaciones por parte del usuario, en el formato de solicitud se insertó un bloque de texto que recuerda qué es una emergencia y una urgencia y que el formulario aplica solamente para la solicitud de trabajos menores de mantenimiento correctivo.
2. *Clasificación de las solicitudes*: el método implementado es capaz de clasificar las solicitudes de trabajos de mantenimiento en las cuatro categorías identificadas en la etapa de definición del alcance. Esto se logra a través de un flujograma y de matrices que evalúan la criticidad del riesgo de servicio, especialidad y seguridad y ambiente. El flujograma hecho responde asertivamente a las prioridades proporcionadas por el equipo de mantenimiento de la Universidad de los Andes. Por último, se hace énfasis que la asertividad nace del alcance definido en el momento de diseño y de la retroalimentación dada por parte del personal de mantenimiento, quienes, con su experiencia, lograron establecer de forma clara y precisa los criterios principales.
3. *Encuesta para la generación de solicitudes*: se diseñó un formato de solicitud concorde al método de priorización definido. Este formato pasó por diferentes etapas de validación. Primero se mapeó algunas solicitudes antiguas (generadas con el formato actual) con el fin de detectar algunos errores en el formato que se estaba desarrollando; p.ej. falta de edificios en el listado desplegable a disposición del usuario. En seguida, se validó el formato con el auxiliar de mantenimiento para revisar si este lograra seleccionar la criticidad en cada criterio a partir de la información contenida en la solicitud. Finalmente, se entrevistaron 10 usuarios indirectos; es decir, las personas que están autorizados en generar las solicitudes de trabajos de mantenimiento. En estas entrevistas, se les invitó a generar una solicitud en el nuevo formato y a proveer su retroalimentación con respecto a este. Las personas entrevistadas concordaron que el formato es claro y guía al usuario de forma en la que este se siente capaz de proveer toda la información solicitada. Sin embargo, tienen inquietudes frente a la extensión de la herramienta y, por lo tanto, a su practicidad.
4. *Aplicación para la asignación de la prioridad*: en la herramienta Excel se simuló todas las rutas posibles del flujograma. El resultado proporcionado por la herramienta siempre coincidió con lo esperado. Por lo tanto, se pudo concluir que la aplicación desarrollada implementaba correctamente el flujograma. Finalmente, se validó la herramienta con el auxiliar de mantenimiento que no tuvo dificultad en utilizarla correctamente.

Dado lo anterior, se puede apreciar que el trabajo cumplió con el alcance establecido. Sin embargo, faltan algunos *pasos de validación* antes de que esté listo para remplazar el proceso actual de solicitud de trabajos de mantenimiento.

El paso más importante es que el flujograma y las matrices de criticidad están basados en ciertos supuestos (p.ej. una avería con consecuencia en la docencia es más grave que una en el área de investigación, etc.) que habría que validar con los altos directivos. Además, sería necesario implementar el método en forma de proyecto piloto con algunos usuarios de prueba para refinar el formato y detectar errores o falta de información. También es necesario asegurarse que el usuario sea capaz de rellenar la información

solicitada, y este conozca un poco acerca del proceso de la ejecución de las ordenes, para así proveer información adecuada. Finalmente, tocaría revisar la efectiva practicidad de la herramienta ya que algunos usuarios mostraron preocupación por su extensión.

Con respecto al *método del flujograma* y en general del análisis de criticidad, esta se mostró una herramienta eficaz para priorizar las solicitudes de trabajos. Aunque los métodos de análisis de criticidad se suelen utilizar para jerarquizar activos, con este trabajo se pudo demostrar que pueden tener utilidad también en otros campos como en el caso desarrollado en este trabajo.

Los autores consideran que el ejercicio mostrado en este capítulo puede ser útil e inspirar empresas e instituciones educativas que podrían necesitar el desarrollo de procesos y herramientas similares. Además, este trabajo mostró como la aplicación de los principios y herramientas de la gestión del mantenimiento tiene que adaptarse al *contexto empresarial* y esto resultó evidente en el caso de una universidad ya que presenta un contexto diferente a lo de una empresa tradicional.

Finalmente, el caso tratado en este trabajo podría tener una cierta relevancia a nivel de *educación en gestión del mantenimiento* ya que representa un ejemplo práctico de la necesidad que tienen las empresas de alinear su contexto, sus valores y sus objetivos organizacionales con sus procesos, y a su vez de como las herramientas tienen que ser alineadas con estos mismos.

5. CONCLUSIONES

Actualmente, contar con una *gestión del mantenimiento* equipada es esencial para el buen funcionamiento de una empresa, ya que esta está estrechamente ligada a la disponibilidad de sus equipos y por ende el logro de sus metas, según sea su caso. Dentro de este organismo, la toma de decisiones debe ser fundamentada por herramientas y metodologías que estén motivadas a cumplir las metas de la organización.

La *identificación y aprobación* es una etapa del proceso de gestión del trabajo caracterizada por la definición de solicitudes de trabajos de mantenimiento y por su aprobación. Una vez generadas las solicitudes, estas se deben analizar y se les asigna una prioridad de ejecución. Aunque existen muchos métodos de priorización de solicitudes de trabajos utilizados en contextos empresariales, los autores no han encontrado aplicaciones de estos a nivel de gestión del mantenimiento de campus e infraestructura universitaria. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo ha sido la definición de un método de priorización de solicitudes de trabajos de mantenimiento que se ajusta a los objetivos y al contexto de universidades.

Dado lo anterior, en el trabajo se desarrolló un *método de priorización* que se basa en la técnica cualitativa del análisis de criticidad del flujograma. El método es capaz de clasificar las solicitudes de trabajos de mantenimiento en cuatro categorías de prioridad teniendo en consideración el contexto, los valores y los objetivos organizacionales de la institución. Además, el método se complementó con dos herramientas para facilitar su implementación futura: una encuesta para la generación de solicitudes de trabajos de mantenimiento y una aplicación para la priorización semiautomática de estas. En este caso, el formato de solicitud de trabajo fue clave para proveer información de valor para una posterior priorización, relacionando las solicitudes de trabajo con sus posibles consecuencias según la situación dada. Finalmente, tanto el método como las herramientas se validaron con diferentes usuarios.

Más allá del método y la herramienta desarrollada, los autores consideran que el ejercicio mostrado en este trabajo representa un *caso de éxito* que puede ser útil e inspirar empresas e instituciones educativas y utilizarse en la educación en gestión del mantenimiento. Lo anterior se debe a que el trabajo mostró cómo la aplicación de los principios y herramientas de la gestión del mantenimiento tienen que adaptarse al contexto empresarial y esto resultó evidente en el caso de una universidad ya que presenta un contexto diferente a lo de una empresa tradicional. Además, el trabajo demuestra en forma práctica la necesidad que tienen las empresas de alinear su contexto, sus valores y sus objetivos organizacionales con sus procesos, y a su vez de como las herramientas tienen que ser alineadas con estos mismos.

Aunque el método y las herramientas desarrolladas parecen prometedoras, faltan algunos pasos de validación antes de que esté listo para reemplazar el proceso actual de solicitud de trabajos de mantenimiento. Por lo tanto, se proponen los siguientes *trabajos futuros*:

1. *Validación con los altos directivos*: el flujograma y las matrices de criticidad del método desarrollado están basados en ciertos supuestos (p.ej. avería con consecuencia en la docencia más grave que la investigación, etc.) que se tendría que validar con los altos directivos
2. *Proyecto piloto*: antes de reemplazar el proceso actual de solicitud de trabajos de mantenimiento, se debería implementar el método en forma de proyecto piloto con algunos usuarios de prueba para refinar el formato y detectar errores o falta de información. En este contexto, sería necesario revisar la efectiva practicidad de la herramienta ya que algunos usuarios mostraron preocupación por su extensión.
3. *Cuantificación del impacto*: una vez que el método se integre oficialmente dentro de los procesos de la universidad, sería importante cuantificar los pros y contras que derivan de su implementación. Para esto, sería interesante hacer uso de algún indicador de mantenimiento para así evaluar si hubo, o no, una mejora en el proceso.

REFERENCIAS

- [1] EN13306. (2017). Maintenance terminology. BSI Standards Publications.
- [2] GFMAM. (2021). The Maintenance Framework. Global Forum on Maintenance and Asset Management.
- [3] Contreras J. (2021). Planificación, programación y costos de mantenimiento. Press.
- [4] Chong A. et al. (2019). Maintenance prioritization – a review on factors and methods, Journal of Facilities Management 17(1), 18-39.
- [5] Echavarría A. et al. (2020). Metodología de mantenimiento preventivo para máquinas de baja utilización. Investigación formativa en ingeniería.
- [6] Parra C. y Crespo A. (2015). Técnicas de jerarquización de activos. Análisis de criticidad. En Ingeman (ed.), Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos (pp. 57-77). Omega.
- [7] UGT. (2015). Portal de riesgos laborales de los trabajadores de la enseñanza. Fundación para la prevención de riesgos laborales. Recuperado: <https://riesgoslaborales.saludlaboral.org/>
- [8] Contreras J. (2021). Calculador de la prioridad de la Orden de Trabajo CALPRIOT. Recuperado: mantenimientoeficiente.com/calpriot

Análisis de la asimilación de las TIC en los productores del Servicio de Asesoría Técnica SAT como contribución a la transformación digital y competitividad de las empresas agrícolas familiares

Carolina Giacaman Becerra¹
Universidad del Bío Bío
Chile

Esta investigación tiene como objetivo determinar los niveles de asimilación de TIC de productores pertenecientes al Servicio de Asesoría Técnica SAT de INDAP, zona Chillán, Chile, atendiendo así a la creciente necesidad de incorporación de TIC en productores locales para mejorar la competitividad. Se utilizó la metodología del estudio asimilación de tecnologías en la cadena de valor de pequeños productores de agricultura protegida guanajuatenses, basada en la Teoría de Acción Razonada y el Modelo de Aceptación Tecnológica. La metodología consiste de la aplicación de un cuestionario para observar las variables de actitud, conectividad, intención de conducta y conducta actual hacia las TIC de los productores, para posteriormente calcular el coeficiente de asimilación de TIC de cada uno de ellos. Los resultados arrojaron bajos niveles de asimilación en general, siendo en promedio de 2,25, la mayoría en el nivel reactivo, lo cual significa que necesitan usar TIC, pero no consideran importante invertir para la toma de decisiones. Por esta razón, se propone realizar asistencia tecnológica atendiendo los factores individuales que dificultan la asimilación, con la finalidad de apoyar el proceso de transformación digital de las empresas.

¹ Ingeniera de Ejecución en Administración de Empresas.
Contacto: cgiacaman@ubiobio.cl

1. INTRODUCCIÓN

El sector agropecuario – silvícola en Chile comprende, por una parte, la actividad agropecuaria, que engloba a la actividad agrícola y la actividad ganadera o pecuaria. En este sector se incluye la producción de cereales, hortalizas, fruticultura, cultivos industriales, viñas y ganadería, entre otras. Por su parte, el sector silvícola abarca las actividades de forestación y explotación o cosecha de bosques, tanto nativo, como plantaciones [1]. La participación en el PIB de Chile del sector agropecuario-silvícola para 2020 fue de 3,4%, disminuyendo el desempeño total de la actividad en un 1,5% respecto del año anterior [2, 3].

De acuerdo con los registros oficiales del VII Censo Nacional Agropecuario de 2007 [4], existen en Chile 301.376 predios, de los cuales, el 73,4% tienen un tamaño inferior a 20 hectáreas, mientras que el 19% se ubica entre 20 y 100 hectáreas. El 7,6% restante tienen un tamaño superior a 100 hectáreas [2]. De acuerdo con cifras del año 2014, en Chile, la Agricultura Familiar Campesina comprende un total de 260.000 explotaciones, siendo éstas el 90% de las unidades productivas en todo el país [5], dichas cifras evidencian la relevancia de la Agricultura Familiar Campesina como factor productivo a nivel nacional.

En la región de Ñuble, el sector silvoagropecuario es el más relevante desde el punto de vista económico; representando, en términos de hectáreas de uso, un 65,5% las plantaciones forestales, un 21% los cultivos anuales, 7,1% forrajeras, 2,1% viñas y parronales, 2,5% frutales y un 1,4% las hortalizas [5]. No obstante, la capacidad productiva de la región es comparativamente baja respecto de las demás regiones del país.

En el área agrícola, las nuevas tendencias globales de consumo apuntan hacia una mayor demanda de frutas y verduras [6]. En la región de Ñuble, la industria de la fruta es importante en comparación con la producción nacional, por lo que se define como un sector relevante y potencial, debido al aumento de la demanda y producción en los últimos años. Ñuble tiene una notable participación en la producción de arándanos (21,68%), frambuesas (43,03%), castañas (71,81%) y moras (24,65%), respecto de la producción a nivel [6].

No obstante, pese a la potencialidad de este mercado, los productores locales presentan una serie de desafíos para posicionarse dentro de la cadena de valor. En la región, son muy pocas las empresas integradas desde la producción hasta la distribución local e internacional. En cuanto a la cadena de valor local, la mayoría de los productores utiliza intermediarios de venta, obteniendo un bajo margen de ganancia. Con menor frecuencia, productores venden a aliados o directamente en un mercado de agricultores (ferias), en este caso, el margen de ganancia aumenta considerablemente, pero se requiere crecer en la producción y contar con la logística para la venta en ferias.

Finalmente, una pequeña cantidad de productores realiza entregas directas al cliente, las cuales permiten un mayor margen de ganancias, siendo necesarias capacidades para gestionar una base de datos de clientes y coordinación logística, todas áreas en las cuales se requiere el uso de Tecnologías de la Información y Comunicación. A lo anterior se suma que los productores están enfocados principalmente a la producción primaria, sin modelos de negocios que los integren en fases más avanzadas de la cadena de valor [6].

Actualmente, el avance tecnológico y el mejor acceso a las TIC ofrecen nuevas herramientas a los productores para competir en los mercados e ingresar a las cadenas de valor globales. No obstante, aún existen importantes brechas respecto de la asimilación de TIC y transformación digital. En la región de Ñuble, los pequeños productores de fruta enfrentan desafíos tales como mejorar la adopción de tecnologías, mejorar la infraestructura tecnológica y la cobertura de internet [6].

En esta línea, la presente investigación aborda la asimilación de Tecnologías de Información y Comunicación, entendida como un proceso de aprovechamiento racional y sistemático del conocimiento, que permitirá innovar en formas de trabajo hacia la eficiencia y efectividad en el uso y aplicación de las TIC [7], con la finalidad de contribuir a los procesos de transformación digital de los productores locales. Lo anterior debido a la relevancia del mercado frutícola a nivel nacional e internacional y a las exigencias de migrar hacia una industria 4.0, que significa un nuevo modelo de organización y control de la cadena de valor, apoyado y hecho posible mediante el uso de Tecnologías de la Información y Comunicación [8].

Este trabajo indagó en los coeficientes de asimilación de TIC de ocho productores pertenecientes al programa SAT Berries de INDAP zona Chillán. Dado lo anteriormente expuesto, la presente investigación tiene como propósito ser un aporte en el área de Agricultura Familiar Campesina, a través de la generación de conocimientos acerca de la asimilación de TIC en productores, y de esta manera contribuir a la transformación digital y competitividad de las empresas agrícolas familiares.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Asimilación tecnológica

La asimilación de tecnología es el proceso que apoya el aprendizaje para el aprovechamiento de la tecnología de manera racional y sistemática. En este sentido, una persona que posee una tecnología profundiza en el conocimiento respecto de ésta. Las principales actividades para lograr la asimilación tecnológica son: documentación de procedimientos, capacitación y actualización de los conocimientos técnicos relativos al proceso [9]. En el proceso de asimilación se logra un dominio total de la tecnología, por lo que la persona puede hacer modificaciones e introducir mejoras, motivado por diversos factores: tecnológicos, de la organización receptora o usuaria, de la productora o vendedora, del mercado, del Estado, del tiempo, entre otros [10]. Además, la asimilación es el grado más alto de adopción tecnológica [11].

Dado lo anterior, es posible determinar que la asimilación tecnológica se produce cuando se incorporan procedimientos y el nuevo conocimiento adquirido modifica la forma de trabajar, vale decir, la conducta de los individuos. Las personas saben utilizar las tecnologías, conocen los efectos de uso y la repercusión que ésta tiene en todas las actividades del sistema de la empresa, por lo que se sienten familiarizadas con ésta.

2.2 Transformación digital

La Transformación Digital se puede definir como un proceso de cambio que una organización inicia para adaptarse al mundo digital, mediante la combinación de la tecnología digital, conocimientos tecnológicos y procesos tradicionales, con la finalidad de ser eficiente, competitivo y rentable [12]. En términos concretos, la Transformación Digital hace referencia a la incorporación de tecnología digital en cada uno de los departamentos o áreas funcionales de una organización [13], involucrando los ámbitos de la empresa, desde el producto hasta el marketing o distribución, pasando por diseño y desarrollo del negocio [14]. La Transformación Digital debe ir de la mano con la gestión de recursos humanos, ya que supone un importante cambio dentro de la organización, por lo que se requiere buenos líderes, conocer la cultura digital y tener un equipo que abarque toda la organización, dónde lo nuevo y lo antiguo convivan [15].

3. MÉTODO

La metodología del presente estudio es de carácter cuantitativa, de diseño correlacional, con un muestreo no probabilístico de carácter intencionado debido a la complejidad que representa la aplicación del instrumento en zonas rurales. La población total de estudio corresponde a 50 usuarios del programa SAT de INDAP zona Chillán, Unidad Operativa Berries, siendo aplicados ocho cuestionarios en total.

La metodología utilizada corresponde a la planteada por [15], en el estudio *Asimilación de tecnologías en la cadena de valor de pequeños productores de agricultura protegida guanajuatenses*. Dicha metodología consideró la aplicación de un cuestionario con preguntas cerradas, dividido en tres secciones: 1) datos de la empresa y del encuestado; 2) utilidad percibida, influencia social, influencia del estado, facilidad de uso percibida, asistencia técnica, conocimientos, intención de uso y de desarrollo de TIC; se empleó la escala de Likert de 1 punto para cada aseveración; donde la calificación de 0 era para totalmente en desacuerdo, 0,25 para en desacuerdo, 0,50 para neutral, 0,75 para de acuerdo y 1 para totalmente de acuerdo; y 3) infraestructura, equipamiento, uso, desarrollo y frecuencia de uso de las TIC por los productores. Se empleó también la escala de Likert de 1 punto para cada aseveración, donde la calificación de 0 era para nunca, 0,25 rara vez, 0,50 a veces, 0,75 frecuentemente y 1 siempre. El análisis descriptivo de datos se realizó en hoja electrónica y el correlacional utilizando SPSS Statistics 28 de prueba para estudiantes (Tabla 1).

Tabla 1. Variables del estudio [15]

Variable	Dimensión	Indicadores
Actitud hacia las TIC	Utilidad Percibida	Utilidad Percibida sobre TIC específicas, Influencia Social, Influencia del Estado, Educación, Edad
	Facilidad de uso percibida	Facilidad de Uso Percibida, Asistencia Técnica, Conocimientos de TIC
Conectividad	Infraestructura	Acceso a Internet, velocidad del Internet
	Equipamiento	Disponibilidad de computador, celular y equipo de apoyo
Intención de conducta hacia las TIC	Intención de uso de TIC	Intención de incorporar TIC en los procesos de la empresa
	Intención de desarrollo TIC	Intención de invertir en desarrollar TIC en la empresa
Conducta actual hacia las TIC	Uso actual de TIC	Frecuencia de uso de TIC en la empresa
	Desarrollo actual de TIC	Inversión actual en desarrollo de TIC en la empresa

El modelo propuesto por la autora, indica que la variable Actitud hacia las TIC posee las dimensiones Utilidad Percibida y Facilidad de Uso Percibida. La Utilidad Percibida estará en función de los indicadores Percepción de Utilidad sobre TIC específicas para uso en la empresa en áreas de gestión, producción, marketing y ventas; Influencia social, por parte de clientes, proveedores, asociaciones y otros productores; Influencia del Estado, a través de instituciones públicas; Educación y Edad.

La Facilidad de Uso Percibida depende de los indicadores Percepción de Facilidad de Uso sobre TIC específicas para uso en la empresa en áreas de gestión, producción, marketing y ventas; Asistencia Técnica otorgada por especialistas y Conocimientos de TIC que tienen los productores en uso de software y hardware. En cuanto a la Conectividad, sus dimensiones son: 1) infraestructura y 2) equipamiento, cuyos indicadores son: a) acceso y velocidad de internet en la empresa, y b) disponibilidad de computador, celular y equipo de apoyo en la empresa, respectivamente.

Respecto de la variable Intención de conducta hacia las TIC, sus dimensiones son: 1) Intención de uso de TIC, y 2) Intención de Desarrollo de TIC; cuyos indicadores son: a) Intención de incorporar TIC en los procesos de la empresa, y b) Intención de invertir en desarrollar TIC específica para la empresa. En cuanto a la variable Conducta Actual hacia las TIC, sus dimensiones son: Uso actual de TIC y Desarrollo Actual de TIC, cuyos indicadores son Frecuencia de uso de TIC en la empresa e Inversión actual en desarrollo de TIC en la empresa. La Actitud hacia las TIC, Conectividad, Intención de conducta hacia las TIC y Conducta actual hacia las TIC, inciden en la Asimilación de TIC [15].

3.1 Metodología coeficiente de asimilación

Para la medición del Coeficiente de Asimilación, en primera instancia se calcularon los coeficientes centrales de Actitud hacia las TIC, Conectividad, Intención de Conducta hacia las TIC, Conducta actual hacia las TIC, y se estimaron las correlaciones Tau Kendal (τ) entre variables e indicadores (Figura 1).

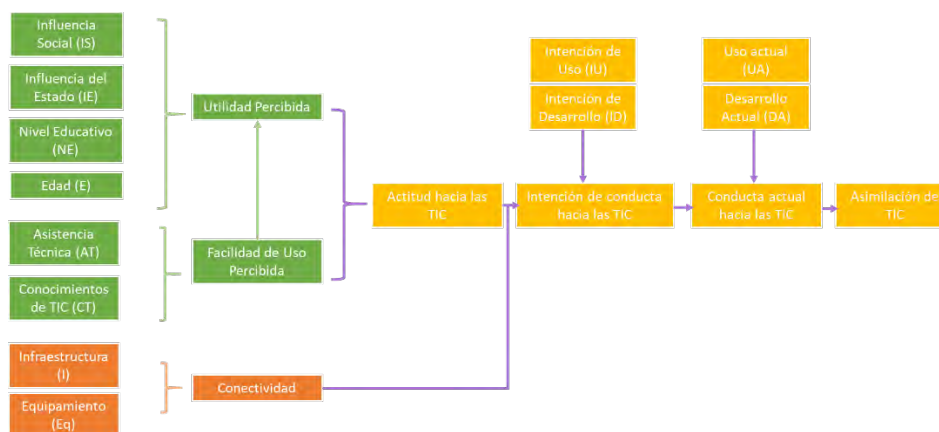


Figura 1. Modelo de asimilación de TIC [15]

3.2 Ecuaciones para el cálculo de coeficientes

Se disponen de las siguientes ecuaciones: ecuación (1) para el coeficiente de utilidad percibida cUP.

$$cUP = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^{n=5} \bar{X} (\text{indicador}_n) = \frac{\bar{X}PU + \bar{X}IS + \bar{X}IE + \bar{X}NE + \bar{X}E}{5} \quad (1)$$

Donde: \bar{x} corresponde a la media calculada del conjunto de respuestas proporcionadas por los productores, pertenecientes a cada indicador que incide sobre el Coeficiente de Utilidad cU, los cuales son: Percepción de Utilidad sobre TIC específicas, Influencia Social, Influencia del Estado, Nivel Educativo y Edad. Para el Coeficiente de Facilidad de Uso cFUP, la ecuación (2).

$$cFUP = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{n=3} \bar{X} (\text{indicador}_n) = \frac{\bar{X}PFU + \bar{X}AT + \bar{X}CT}{3} \quad (2)$$

Donde: \bar{x} corresponde a la media calculada del conjunto de respuestas proporcionadas por los productores, pertenecientes a cada indicador que incide sobre el coeficiente de Facilidad de Uso Percibida (cFUP), los cuales son: Percepción de Facilidad de Uso, Asistencia Técnica y Conocimientos de TIC. Con la obtención de las ecuaciones (1) y (2) para los coeficientes cU y cFU, es posible establecer la ecuación (3) para calcular el Coeficiente de actitud hacia las TIC cAc.

$$cAc = cUP + cFUP \quad (3)$$

Para el Coeficiente de conectividad cCo se dispone de la ecuación (4).

$$cCo = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{n=2} \bar{X} (\text{indicador}_n) = \frac{\bar{X}I + \bar{X}Eq}{2} \quad (4)$$

Donde \bar{x} corresponde a la media calculada del conjunto de respuestas proporcionadas por los productores, pertenecientes a los indicadores de las dimensiones Infraestructura y Equipamiento. La ecuación (5) para Coeficiente de Intención de la conducta hacia las TIC cIC.

$$cIC = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{n=2} \bar{X} (\text{indicador}_n) = \frac{\bar{X}IU + \bar{X}ID}{2} \quad (5)$$

Donde \bar{x} corresponde a la media calculada del conjunto de respuestas proporcionadas por los productores, pertenecientes a los indicadores de las dimensiones Intención de Uso de TIC e Intención de Desarrollo de TIC. Para el Coeficiente de Conducta actual hacia las TIC cCA se tiene la ecuación (6).

$$cCA = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{n=2} \bar{X} (\text{indicador}_n) = \frac{\bar{X}UA + \bar{X}DA}{2} \quad (6)$$

Donde \bar{x} corresponde a la media calculada, del conjunto de respuestas proporcionadas por los productores, pertenecientes a los indicadores de las dimensiones Uso actual de TIC y Desarrollo actual de TIC. Para el Coeficiente de Asimilación de TIC cAS, la ecuación (7).

$$\sum (cAc + cCo + cIC + cCA) \quad (7)$$

3.3 Cálculo de correlaciones entre Variables e Indicadores

Se aplicaron estadísticas no paramétricas mediante la correlación de Tau (τ) de Kendall entre los factores del modelo, esto con la finalidad de conocer la influencia que ejercen sobre sus variables centrales correspondientes [15]:

- Correlación entre indicadores: Percepción de Facilidad de Uso, Asistencia Técnica y Conocimientos TIC.
- Correlación entre indicadores Percepción de Utilidad, Influencia Social, Influencia del Estado, Nivel Educativo y Edad.
- Correlación entre Coeficiente de Facilidad de Uso Percibida cFUP, Coeficiente de Utilidad Percibida cUP y Coeficiente de Actitud hacia las TIC cAc.
- Correlación entre Coeficiente de Actitud hacia las TIC cAc, Coeficiente de Conectividad cCo y Coeficiente de Intención de conducta hacia las TIC cIC.

- Correlación entre Coeficiente de Intención de conducta hacia las TIC cIC y Coeficiente de Conducta actual hacia las TIC cCA.
- Correlación entre coeficiente de Conducta actual hacia las TIC cCA y Coeficiente de Asimilación TIC cAS

3.4 Escala de niveles de asimilación

[15] propone una escala de niveles de asimilación denominada T-Roque (Tabla 2).

Tabla 2. Niveles de asimilación

Puntuación	Nivel	Descripción
<1	Oposición	El productor no usa TIC y no considera usarlas en su unidad de producción, por miedo o desconfianza.
>1 y <2	Desconoce	No sabe cómo usar las TIC y desconoce su utilidad
>= 2y <3	Reactivo	Necesita usar TIC, pero no considera importante invertir en éstas, para la toma de decisiones.
>=3 y <=4	Gestiona	Usa las TIC para su toma de decisiones, se comunica con los actores de los demás eslabones de la cadena de valor, a través de éstas y las considera una ventaja competitiva
>4	Centrado en la Innovación	Preocupado en optimizar sus procesos de gestión de la información y comunicación, a través del impulso a la innovación de TIC.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Correlaciones Tau Kendal (τ) entre variables e indicadores, que inciden en el cálculo del Coeficiente de Asimilación

4.1.1 Correlación entre indicadores Percepción de Facilidad de Uso, Asistencia Técnica y Conocimientos TIC

	AT	Co
Correlación PFU	0,182	0,964

Esto indica que existe correlación entre la Percepción de Facilidad de Uso, la Asistencia Técnica y Conocimientos de TIC. No obstante, en el caso de la Asistencia Técnica esta correlación es menor, por lo que los conocimientos previos que se tienen acerca de las TIC resultan ser los más relevantes ante la Percepción de Facilidad de Uso.

4.1.2 Correlación entre indicadores Percepción de Utilidad, Influencia Social, Influencia del Estado, Nivel Educativo y Edad

	IS	IE	NE	Edad
Correlación PU	0,327	-0,036	0,591	-0,276

En este caso, se ha podido determinar que existe una correlación negativa entre la Percepción de Utilidad y la Edad, lo que quiere decir que, a mayor edad, menor es la Percepción de Utilidad. Existe una directa relación entre Escolaridad y Percepción de Utilidad, lo que quiere decir que, a mayor nivel de escolaridad, los productores perciben las TIC como más útiles; mismo caso para la Influencia Social que ejerce el entorno.

Finalmente, la Influencia del Estado tiene una leve correlación negativa en la Utilidad Percibida, tendiente a cero, por lo que actualmente los incentivos desde el Estado no logran que los productores perciban que las TIC sean útiles para sus negocios.

4.1.3 Correlación entre Coeficiente de Facilidad de Uso Percibida cFUP, Coeficiente de Utilidad Percibida cUP y Coeficiente de Actitud hacia las TIC cAC

	cFUP	cUP
Correlación cAC	0,214	0,286

En cuanto a la correlación entre Facilidad de Uso Percibida y Utilidad Percibida, es posible corroborar que, a mayor Facilidad de Uso Percibida, mayor es la Utilidad Percibida. Mismo caso para la correlación entre el Coeficiente de Actitud y Facilidad y Utilidad Percibida, lo que significa que, a mayor percepción de facilidad de uso y utilidad de las TIC, mejor es la actitud hacia a incorporación de TIC. Correlación cFUP y cUP = 0,357, lo que significa que existe una correlación entre la Facilidad de Uso y la Utilidad Percibida de las TIC.

4.1.4 Correlación entre Coeficiente de Actitud hacia las TIC cAc, Coeficiente de Conectividad cCo y Coeficiente de Intención de conducta hacia las TIC cIC

Coeficiente de correlación cIC	cAc	cCo
	0,143	-0,109

Es posible determinar que existe relación entre el Coeficiente de Actitud y el Coeficiente de Intención de conducta, aunque esta es de carácter moderada, lo que significa que, a mayor Actitud hacia las TIC, mayor es la Intención de conducta hacia las TIC. Respecto de la correlación entre el Coeficiente de Intención de Uso y el Coeficiente de Conectividad, ésta es de carácter inverso, es decir, a mayor conectividad, en este caso, existe una menor intención de uso, y viceversa, a menor conectividad, mayor intención de uso.

4.1.5 Correlación entre Coeficiente de Intención de conducta hacia las TIC cIC y Coeficiente de Conducta actual hacia las TIC cCA

La Correlación entre cIC y cCA es de 0,618, lo que significa que la Intención de conducta tiene una importante incidencia en la Conducta actual hacia las TIC

4.2 Cálculo del Coeficiente de Asimilación

4.2.1 Coeficiente de Actitud cAC

El coeficiente de Facilidad de Uso Percibida (Tabla 3) se calculó con los indicadores Facilidad de Uso Percibida PFU, Asistencia Técnica AT y Conocimiento de TIC Co.

Tabla 3. Coeficiente de Facilidad de Uso Percibida

N	PFU	AT	Co	cFUP
1	0,39	0,21	0,45	0,35
2	0,50	0,54	0,45	0,50
3	0,68	0,93	0,78	0,79
4	0,64	0,43	0,50	0,52
5	0,78	0,39	0,80	0,66
6	0,69	0,54	0,80	0,68
7	0,83	0,43	0,83	0,70
8	0,06	0,32	0,00	0,13

Respecto de la Facilidad de Uso Percibida PFU, para un 88% del total de productores consultados, es fácil consultar el clima por Internet, un 63% percibe como fácil utilizar correo electrónico, a su vez, dicho porcentaje considera que le sería fácil usar aplicaciones móviles de agricultura. Un 50% se declara neutral ante la afirmación de *Podría comunicarme fácil con mis proveedores, por Internet*. Un 38% indica que puede consultar fácilmente por alertas de plagas en Internet, consultar los precios de productos y comunicarse con proveedores. Un 63% está en desacuerdo con que se puede comunicar más rápido con sus clientes por página web, y un 38% se manifiesta en desacuerdo de que sería más fácil comunicarse con sus clientes por Redes Sociales.

Lo anterior indica que las principales facilidades de uso guardan relación con consultar el clima, utilizar correo electrónico y aplicaciones móviles. Respecto de la comunicación con clientes y proveedores, los productores no perciben que ésta sea más expedita la mediante herramientas tecnológicas (página web y Redes Sociales). A su vez, para la consulta de precios no se percibe que el Internet como una herramienta útil.

Respecto de la Asistencia Técnica AT, un 88% señala no recibir capacitación para usar las TIC ni asesorías para usar TIC. Un 63% considera que las aplicaciones móviles no tienen ayuda ni manuales para consultar en caso de ser necesario. Un 50% afirma tener contacto con extensionistas para aclarar dudas respecto del uso de TIC, cuenta con un consultor que les ayuda en caso de algún problema con las TIC y declara que los portales web que consulta no tienen personal que aclaran dudas para usarlos. Lo anterior evidencia que no existen instancias formales en las cuales los productores puedan adquirir conocimientos y recibir asesorías técnicas respecto del uso de TIC.

En cuanto a Conocimientos previos de TIC Co, un 88% señala que conoce como usar Internet para consultar el clima, el 75% declara que puede usar el correo electrónico, y un 88% indica que puede usar una red social. Un 50% se declara neutro ante la afirmación *Conozco la manera de comunicarme con mis proveedores, a través de Internet*, un 50% se ha capacitado en el uso de Internet y solo un 25% declara conocer cómo realizar la declaración de impuestos por Internet.

El Coeficiente de Facilidad de Uso Percibida, promedia un total de 0,54, por lo que se puede inferir que las TIC son percibidas como no fáciles de usar en todas las funciones planteadas para una empresa, lo que puede incidir en la Actitud de los productores hacia éstas.

El Coeficiente de Utilidad Percibida cUP se observa en la Tabla 4. En cuanto a la Percepción de Utilidad, un 75% considera que las TIC son útiles para hacer nuevos clientes y para comunicarse con otros productores, un 63% para vender productos y consultar el clima, un 50% para administrar las empresas y buscar nuevos proveedores. Un 38% considera que son útiles para elegir qué productos sembrar y consultar sobre amenazas y control de plagas, y solo un 25% considera que son útiles para consultar precios.

Tabla 4. Coeficiente de Utilidad Percibida

N	PU	IS	IE	NE	E	cUP
1	0,25	0,56	0,50	0	1,00	-0,14
2	0,58	0,75	0,50	0,5	1,00	0,07
3	0,56	0,69	0,84	0,25	0,50	0,03
4	0,61	0,59	0,28	0,5	0,75	0,13
5	0,97	0,69	0,22	0,75	0,25	0,39
6	0,47	0,78	0,53	0,5	0,75	0,09
7	0,50	0,69	0,63	0,75	0,25	0,21
8	0,00	0,5	0,06	0	0,75	-0,06

Respecto a la Influencia Social un 88% indica que tanto clientes como proveedores les piden contactarse vía WhatsApp, 88% manifiesta que envía información por Internet, un 75% indica que otros productores utilizan aplicaciones móviles de agricultura, un 63% considera que otros productores usan Internet y que el banco ofrece banca móvil para transacciones, y un 50% considera que usar la banca por Internet es inseguro.

En cuanto a la edad de los productores, el 25% se encuentra en el rango 30-39 años, un 12,5% en el rango 40-49 años, el 37,5% se ubica en el rango 50-59 años y un 25% posee más de 60 años. Respecto del Nivel Educativo, un 25% posee estudios máximos de educación básica, un 12,5% estudios máximos de educación media, un 37,5% tiene estudios máximos de técnico, un 25% educación máxima universitaria y un 25% posee postítulo.

En cuanto a la Influencia del Estado un 88% considera que el gobierno le ha solicitado registrarse a través de Internet y ha escuchado que existen leyes para combatir delitos por Internet. Un 75% indica que el gobierno proporciona información para su negocio a través de Internet, un 63% considera que existen apoyos del gobierno mediante aplicaciones móviles, y que el gobierno invita a utilizar TICs. Un 38% indica conocer que existen leyes que protegen para realizar negocios por Internet y solo un 13% manifiesta que el gobierno invita a capacitarse en el área de las TIC.

Finalmente, los resultados del Coeficiente de Utilidad Percibida, indican que este se encuentra en niveles bajos. Las TIC se perciben útiles para hacer nuevos clientes, contactarse con otros productores y vender productos, quedando relegada el área de administración, elección de productos y consulta de precios. En

este sentido, será de gran relevancia la transferencia efectiva de conocimientos respecto de las diferentes utilidades que tienen las TIC en las diversas áreas de las empresas, así como de las políticas de protección y seguridad de datos e incentivos de parte del Estado para la incorporación de TIC.

4.2.2 Coeficiente de Actitud cAC

La mayoría de los productores posee un Coeficiente de Actitud cAC en niveles bajos (Tabla 5). Dado que la Actitud es de gran relevancia para la Asimilación de TIC, puesto que determina la conducta, es importante considerar desde un principio, diferentes instancias que contribuyan a dar a conocer la importancia de utilizar las TIC en las empresas, enseñar a utilizar las TIC de manera eficaz, otorgar asistencia y acompañamiento continuo, diseñar softwares específicos para las empresas, todo lo anterior considerando las diferencias de edad y niveles de educación de los productores.

Tabla 5. Coeficiente de Actitud cAC

N	cFUP	cUP	cAc
1	0,35	-0,14	0,11
2	0,50	0,07	0,28
3	0,79	0,03	0,41
4	0,52	0,13	0,33
5	0,66	0,39	0,52
6	0,68	0,09	0,39
7	0,70	0,21	0,45
8	0,13	-0,06	0,03

4.2.3 Coeficiente de Conectividad cCo

En cuanto a la Infraestructura (Tabla 6), el 100% de los consultados declara que puede comunicarse con sus clientes vía Internet, un 87,5% indica que se puede comunicar con otros productores mediante Internet, el 75% indica que se puede comunicar con sus proveedores por Internet, el 62,5% declara que su Unidad Productiva puede contar con acceso a Internet, el 50% señala que en su comunidad existe acceso a Internet, un 24% indica que su Unidad Productiva cuenta con internet 24/7/365 y un 12,5% declara que el servicio de Internet es muy rápido, y que la compañía de Internet atiende problemas en un plazo máximo de 5 días.

Tabla 6. Coeficiente de Conectividad cCo

N	I	Eq	cCo
1	0,31	0,75	0,53
2	0,63	0,59	0,61
3	0,31	0,91	0,61
4	0,47	0,56	0,52
5	0,78	0,94	0,86
6	0,59	0,38	0,48
7	0,59	0,72	0,66
8	0,56	0,63	0,59

Respecto del Equipamiento, el 100% declara tener celular inteligente, un 87,5% indica que puede acceder a Redes Sociales a través de su celular, el 62,5% declara tener computador para la administración, equipo informático de apoyo, acceso a portales para consultar información a través del computador y acceso a aplicaciones móviles de agricultura. El 50% indica que puede acceder a Redes Sociales a través del computador, y un 12% señala que la compañía que repara equipos, lo hace un plazo máximo de 5 días.

4.2.4 Coeficiente de Intención de conducta hacia las TIC cIC

Respecto de la Intención de Uso de TIC (Tabla 7), el 63% dice entender los beneficios de las TIC para su negocio, entiende la forma en que las TIC pueden apoyar su negocio y cree que si no incorpora TIC el negocio decaerá. El 50% afirma que incorporar TIC a su negocio significa un costo muy alto, ha pensado usar TIC para mejorar el negocio, no entiende cómo las TIC harán que el negocio sea más rentable, considera que contactar nuevos clientes por Internet ayudará al crecimiento del negocio y un 38% declara conocer dónde se pueden aplicar las TIC para mejorar su negocio.

Tabla 7. Coeficiente de Intención de conducta

N	IU	ID	cIC
1	0,56	0,31	0,44
2	0,38	0,19	0,28
3	0,66	0,16	0,41
4	0,53	0,56	0,55
5	0,72	0,13	0,42
6	0,69	0,31	0,50
7	0,78	0,38	0,58
8	0,13	0,13	0,13

En cuanto a la Intención de Desarrollo, vale decir, el utilizar TIC diseñadas específicamente para sus negocios, un 38% declara que cuenta con personal para desarrollar TIC y que el desarrollar TIC implica una inversión que la empresa no puede hacer. El 25% indica que es más barato desarrollar TIC que comprarlas, ha pensado invertir en tecnología para desarrollar TIC, no ha considerado desarrollar TIC y cree que desarrollar TIC beneficiará más a la empresa, que comprarlas. Solo un 13% ha considerado contratar desarrolladores TIC para la empresa y capacitar al personal para desarrollar TIC.

El Coeficiente de Intención de conducta hacia las TIC cIC se encuentra en un nivel medio en la mayoría de los productores. Lo anterior hace necesario reforzar la importancia de desarrollar TIC en las empresas, trabajar de manera personalizada en las diferentes áreas en las cuales se pueden incorporar TIC y proveer de Infraestructura y Equipamiento necesarios para la implementación.

4.2.5 Coeficiente de Conducta actual hacia las TIC cCA

En cuanto al Uso Actual de TIC (Tabla 8), el 78% declara que las utiliza para consultar el clima, un 50% para Redes Sociales con finalidad de comunicarse con clientes o proveedores, un 38% utiliza el correo electrónico, un 26% consulta los portales web de INDAP u otros, y precios de productos, un 25% utiliza un Software para administrar su negocio. Un 12,5% declara consultar acerca de plagas utilizando TIC y usar una aplicación para comprar y vender. Un 100% declara no utilizar alguna aplicación para mejorar su producción.

Tabla 8. Coeficiente de Conducta Actual hacia las TIC

N	UA	DA	cCA
1	0,17	0,14	0,15
2	0,08	0,00	0,04
3	0,56	0,00	0,28
4	0,25	0,36	0,30
5	0,56	0,00	0,28
6	0,22	0,00	0,11
7	0,69	0,25	0,47
8	0,00	0,00	0,00

En cuanto al Desarrollo Actual, vale decir, el utilizar TIC diseñadas específicamente para sus negocios, actualmente ningún productor se encuentra desarrollando TIC en sus empresas. En consecuencia, el Coeficiente de Conducta actual cCA indica bajos niveles en general, lo cual es determinante para la Asimilación de TIC, ya que evidencia que las TIC no están siendo incorporadas, ni tampoco desarrolladas en la mayoría de los casos.

4.2.6 Coeficiente de Asimilación de TIC cAS

La Correlación entre cCA y cAS = 0,327, lo que significa que la Conducta Actual tiene incidencia la Asimilación de TIC (Tabla 9). Respecto de los promedios de coeficientes, el Coeficiente de Actitud cAc, se encuentra en un nivel medio, con un promedio de 1,03, lo cual se puede explicar en gran parte por una baja Utilidad Percibida hacia las TIC. En cuanto al Coeficiente de Conectividad cCo, los resultados se encuentran en un nivel medio, cuyo promedio es 0,61, siendo en proporción el índice con resultado más alto, contando los productores con infraestructura y equipamiento básicos para la comunicación, principalmente conexión a internet, celular y computador, aunque este último se observa en menor medida.

Tabla 9. Coeficiente de Asimilación

N	cAc	cCo	cIC	cCA	cAs	Nivel
1	0,24	0,53	0,44	0,15	1,37	Desconoce
2	0,51	0,61	0,28	0,04	1,44	Desconoce
3	0,76	0,61	0,41	0,28	2,06	Reactivo
4	0,93	0,52	0,55	0,30	2,30	Reactivo
5	1,21	0,86	0,42	0,28	2,77	Reactivo
6	1,35	0,48	0,50	0,11	2,45	Reactivo
7	1,58	0,66	0,58	0,47	3,29	Gestiona
8	1,61	0,59	0,13	0,00	2,33	Reactivo
X	1,03	0,61	0,41	0,20	2,25	Reactivo

Por otra parte, los resultados del Coeficiente de Intención de conducta cIC se encuentran en un nivel medio bajo, con un promedio de 0,41, destacando la Intención de Uso de TIC, ya que los usuarios manifiestan tener conocimiento de que éstas pueden ayudar a mejorar el negocio en general, no obstante, desconocen cómo utilizarla específicamente para que se traduzca en beneficios concretos hacia el negocio.

En cuanto al Coeficiente de Conducta Actual cCA, los valores son bajos, teniendo un promedio de 0,2, siendo el coeficiente central con peor desempeño. En este ámbito, se destaca que la mayoría utiliza TIC para consultar el clima y redes sociales, no obstante, muy pocos utilizan correo electrónico y software para administrar sus negocios, así como ninguno de los productores utiliza aplicaciones móviles para mejorar la producción o venta. Respecto del Desarrollo Actual, ninguno desarrolla TIC específicas para el negocio.

Por lo anterior, los productores tienen bajos niveles de Coeficiente de Asimilación (cAs) en general. El 25% de los productores se encuentran en el nivel Desconoce, lo cual significa que no saben cómo usar las TIC y desconocen su utilidad, el 63% se encuentra en el nivel Reactivo, lo cual significa que necesitan usar TIC, pero no consideran importante invertir en éstas, para la toma de decisiones.

Finalmente, el 13% se encuentra en un nivel mayor, denominado Gestiona, lo que significa que usa las TIC para su toma de decisiones, se comunica con los actores de los demás eslabones de la cadena de valor, a través de éstas y las considera una ventaja competitiva.

4.3 Recomendaciones para contribuir a la asimilación de TIC de productores pertenecientes al Servicio de Asesoría Técnica SAT de INDAP, en el área Chillán

Para facilitar el proceso de Transformación Digital de los productores locales, es fundamental iniciar un proceso que contemple cada uno de los factores que inciden actualmente en la asimilación de TIC. Luego del análisis, es posible determinar lo siguiente:

- Los usuarios no reciben asistencia técnica en TIC
- Los usuarios no reciben capacitaciones en TIC
- Los conocimientos en TIC no determinan un mayor uso de TIC
- La conectividad no determina un mayor uso de TIC
- La intención de uso no se materializa en un uso concreto de TIC
- Existe subutilización y falta de infraestructura y equipamiento
- Las TIC no están siendo utilizadas de manera eficiente y eficaz para la competitividad de las empresas
- Los productores consideran las TIC como una herramienta de comunicación básica
- Ningún productor se encuentra desarrollando TIC

Dado lo anterior, el enfoque de asimilación de TIC debe ser de carácter integral, centrado en agregar valor a las empresas, fortalecer elementos de la cadena de valor local y propiciar la incorporación de los productores a la cadena de valor global.

También debe tener un carácter personalizado. Para ello, será necesario dar a conocer en primera instancia, las ventajas competitivas que generará la incorporación de tecnologías y cómo mediante las TIC, se mejora la rentabilidad de las empresas, de manera de mejorar la Percepción de Utilidad.

Por lo anterior, se plantea incorporar Asistencia Tecnológica a los productores, mediante un proceso de acompañamiento continuo para la Transformación Digital. Dicha asistencia, se propone en diferentes etapas que permitan abarcar lo recopilado en la presente investigación:

1. *Inducción*: charlas referentes a la importancia, utilidad y alternativas de incorporación de TIC en las empresas.
2. *Diagnóstica*: identificar procesos de negocios de las empresas, con la finalidad de determinar en qué áreas se puede incorporar TIC para la optimización de dichos procesos, determinar equipamientos que posee la empresa, acceso a internet y nivel de alfabetización digital del personal.
3. *Asistencia Técnica*: priorización de áreas críticas claves para la digitalización, transferencia de propuesta de soluciones priorizadas, vinculación con fuentes de financiamiento para obtención y desarrollo de TIC, capacitaciones para la asimilación de TIC que involucren herramientas para la incorporación de TIC en las empresas, así como el liderazgo y la gestión de recursos humanos para la Transformación Digital.
4. *Seguimiento continuo*: seguimiento de las intervenciones y registro de indicadores de medición.

5. CONCLUSIONES

Los resultados arrojaron bajos niveles en el Coeficiente de Actitud hacia las TIC, con un promedio de 1,03. Dichos resultados están determinados principalmente por una baja Utilidad Percibida, determinada a su vez por la Edad de los productores, Niveles de educación y una negativa Influencia del Estado; a su vez, incide en la actitud la Facilidad de Uso Percibida, influida en gran parte por la ausencia de Asistencia Técnica y capacitaciones en uso de TIC, además de un conocimiento de uso de los productores, centrado en consultar el clima, el correo electrónico y las redes sociales. Lo anterior es superior a lo alcanzando los productores de agricultura protegida de Guanajuato un promedio de 0,32 de Coeficiente de Actitud hacia las TIC [15].

Respecto del Coeficiente de Conectividad, los resultados arrojan un promedio de 0,61, siendo en términos proporcionales, el coeficiente con mejor rendimiento, contando los productores con acceso a Internet, no caracterizándose éste por tener buenos niveles de cobertura y velocidad. Los valores son relativamente mayores a lo alcanzando por los productores de agricultura protegida de Guanajuato, quienes obtuvieron un promedio de 0,36 [15].

En cuanto al Coeficiente de Intención de conducta hacia las TIC, los resultados arrojaron un promedio de 0,41, lo cual se sitúa en un nivel bajo, existiendo baja intención de desarrollo de TIC, si bien, la mayoría afirma que las TIC otorgarán beneficios a las empresas, se desconoce dónde aplicar específicamente las TIC y cómo éstas lograrán aumentar la rentabilidad. Lo anterior es superior a lo planteado a lo obtenido por los productores de agricultura protegida, quienes alcanzaron un promedio de 0,15 en dicho coeficiente [15].

Respecto del Coeficiente de Conducta actual hacia las TIC, se obtuvieron bajos resultados, teniendo un promedio de 0,2. Las TIC en su mayoría son utilizadas para consultar el clima y para Redes Sociales, pero escasamente para la administración y producción. Lo anterior coincide con lo analizado con los productores de agricultura protegida, quienes tienen un promedio de 0,13 [15].

Los resultados de los Coeficientes de Asimilación de TIC son bajos, promedio de 2,25, cifra que supera a la de los pequeños productores de agricultura protegida, quienes alcanzaron un promedio de 1,19 [15].

No obstante, la presente investigación evidenció falta de asistencia técnica y capacitación en TIC, y que, pese a que los productores tienen nociones y conocimientos de usos de las Tecnologías de Información y Comunicación, así como acceso a Internet, aquello no se traduce necesariamente en una asimilación efectiva de las tecnologías. Por lo anterior, las TIC no están siendo utilizadas de manera eficiente y eficaz en las empresas. En este sentido, es importante que la labor de extensionismo pueda incorporar estrategias que apunten hacia la Transformación Digital, entendiendo que el mercado de berries es altamente competitivo, y que los productores requerirán de estas herramientas para poder ingresar a éste de manera eficiente, atendiendo a los estándares que exige actualmente la industria y estando permanentemente

vinculados con los demás eslabones de la cadena de valor. De esta manera, se contribuirá a reeditar la potencialidad que actualmente tiene la producción de berries en la región de Ñuble

REFERENCIAS

- [1] Servicio de Impuestos Internos. (2020). Todos los códigos de actividad económica. Recuperado: http://www.sii.cl/ayudas/ayudas_por_servicios/1956-codigos-1959.html
- [2] ODEPA. (2017). Agricultura Chilena. Reflexiones y desafíos al 2030. Press.
- [3] Banco Central de Chile. (2020). Cuentas nacionales de Chile. Evolución de la actividad económica segundo trimestre de 2020. Recuperado: https://www.bcentral.cl/documents/33528/762418/CCNN_2020_II.pdf/631e2795-8874-7450-0ce8-31f282d46c74?t=1597716430970
- [4] Instituto Nacional de Estadísticas. (2009). Las Pequeñas y Medianas Explotaciones. Vii Censo Agropecuario y Forestal 2006-2007.
- [5] Gobierno Regional de Ñuble. (2020). Estrategia Regional de Desarrollo 2020-2028.
- [6] Banco Mundial. (2020). Análisis en profundidad de las Principales Cadenas de Valor Global de Ñuble y Opciones de Reposicionamiento Estratégico. Recuperado: <https://www.goredenuble.cl/sites/default/files/documentos/An%C3%A1lisis%20en%20profundidad%20de%20las%20Principales%20Cadenas%20de%20Valor%20Global%20de%20C3%91uble%20y%20Opciones%20de%20Reposicionamiento%20Estrat%C3%A9gico.pdf>
- [7] Belloso N. y Perozo M. (2009). Asimilación de tecnología de información y comunicación en las alcaldías de Venezuela. *Revista de Ciencias Sociales* 15(1), 139-147.
- [8] del Val Román J. (2016). Industria 4.0: La transformación digital de la industria. Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática. Informes CODDII. Valencia.
- [9] Armstrong P. y Sambamurthy V. (1999). Information technology assimilation in firms: The influence of senior leadership and IT infrastructures. *Information systems research* 10(4), 304-327.
- [10] Espósito C. (1995). Gerencia Tecnológica del Instituto de la Uva. Avance de Investigación Proyecto 04-4.
- [11] Fichman R. (2001). The diffusion and assimilation of information technology innovations. *Framing the domains of IT management: Projecting the future through the past* (105127), 105-128.
- [12] Cabezas J. (2015). La gran oportunidad: Claves para liderar la transformación digital en las empresas y en la economía. Grupo Planeta.
- [13] Bedoya T. (2019). Transformación digital y la industria 4.0. Press.
- [14] Martínez J. (2016). La transformación digital y su repercusión en las empresas. Disertación doctoral. Universitat Politècnica de València.
- [15] Rodríguez C. (2020). Asimilación de tecnologías en la cadena de valor de pequeños productores de agricultura protegida guanajuatenses. Disertación Doctoral. Universidad Autónoma de Querétaro.

Diseño de prototipo de destilador solar activo de doble pendiente, como método de obtención de agua potable

Mauren Catalina Buelvas Rojano¹
Roberto José Calderón Bermejo²
Iván Darío Rojas Arenas³
Nicolas Restrepo Henao⁴
Institución Universitaria Pascual Bravo
Colombia

El acceso al agua potable es una problemática en muchas regiones del mundo, sobre todo en aquellas comunidades más alejadas de los cascos urbanos que no cuentan con una adecuada infraestructura de servicios. En Colombia la situación no es menos preocupante, de allí que sea relevante el estudio de alternativas de solución a esta problemática. Acorde con esto, en el presente trabajo se plantea el diseño de un prototipo de destilador solar activo de doble pendiente, tomando como premisas principios del diseño en ingeniería como el bajo costo, fácil instalación, manejo y mantenimiento; así como una estructura lo más simple y funcional posible constituida por piezas de fácil consecución o construcción. Para tal efecto se plantea una metodología investigativa exploratoria, descriptiva y aplicada, dividida en 6 etapas; dentro de los resultados planteados se tiene tanto el diseño del dispositivo como su construcción y validación, aunque para este capítulo solo se muestran los resultados relativos al diseño. De igual forma se pretende realizar aportes al medio académico a partir de la escritura de textos para ser evaluados en publicaciones científicas, así como la participación en eventos académicos. Finalmente, se espera que la investigación sirva de aporte para futuros trabajos en la misma línea, así como para el planteamiento de alternativas de solución a la problemática de la escasez de agua potable.

¹ Ingeniera Industrial.

Contacto: m.buelvas89@pascualbravo.edu.co

² Desarrollador de Software.

Contacto: roberto.calderon327@pascualbravo.edu.co

³ Magister en Gestión de la Innovación Tecnológica.

Contacto: ivan.rojasar@pascualbravo.edu.co

⁴ MBA.

Contacto: nrestrepo@pascualbravo.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda el diseño de un prototipo de destilador solar de doble pendiente, por medio del cual se pretende obtener agua apta para el consumo humano. El destilador solar es un sistema simple capaz de transformar aguas negras o salobres en agua potable usando únicamente radiación solar. La importancia de estudiar e implementar este tipo de tecnologías radica en la necesidad creciente de agua dulce a nivel mundial y de generar alternativas para su obtención en un marco de sostenibilidad [1]; es claro que la escasez del líquido presupone una problemática enorme, más aún con el aumento constante de la población, y por ende también de las necesidades de acceso a recursos básicos, lo cual en muchas regiones es bastante complejo.

Colombia no es ajena a esta situación, de allí que existen zonas en donde el suministro de agua potable es muy regular, o ni siquiera existe, dado que no cuentan con sistemas de tratamiento o redes de distribución, lo cual se suma a una serie de dificultades de tipo social y económico que hacen que estos lugares tengan pocas posibilidades para un desarrollo económico sostenible [2]. Esto es fundamental debido a que la formulación, desarrollo y ejecución de proyectos para la implementación de sistemas como los mencionados son relativamente costosos, y los recursos públicos para su construcción son difíciles de obtener.

Lo anterior contrasta con la realidad de un mundo inmerso en la llamada Industria 4.0, en donde los sistemas productivos se enlazan de manera inteligente, lo que implica un acceso a los recursos desde cualquier lugar del planeta, lo cual no concuerda con las realidades de muchas regiones vulnerables del país [3]. En consonancia con lo expresado, se tiene que la prestación del servicio de acueducto en áreas rurales no solo resulta costosa para su implementación, sino que además es poco rentable dadas las bajas densidades poblacionales y la dispersión de viviendas, de allí que se requiera de otras alternativas de solución para esta problemática, que puedan complementar o suplir el suministro de agua potable en las regiones menos favorecidas.

Así las cosas, y de conformidad con lo planteado en los párrafos anteriores, en el presente trabajo de tipo investigativo se propone el diseño de un destilador de doble pendiente como método de obtención de agua potable para comunidades vulnerables en Colombia, teniendo en cuenta que se trata de una tecnología de bajo costo para su construcción y puesta en marcha, de fácil operación, portable, con pocos requerimientos para su mantenimiento y con una eficiencia considerada aceptable. Sumado a lo anterior, se tiene que el proceso de obtención de agua potable a través de este tipo de dispositivos se hace de forma sostenible, y dadas todas las características antes mencionadas se puede acceder con el mismo a cualquier región del país pudiese necesitar este tipo de mecanismos.

2. MARCO REFERENCIAL

[4] presentan un análisis de energía del desempeño de un alambique solar activo de doble pendiente bajo modo de circulación forzada, construido en el departamento de Ingeniería Mecánica, Colegio de Ingeniería y Tecnología de Galgotias, Gran Noida, India. Para los autores, los destiladores solares tienen la ventaja de ser dispositivos sencillos por medio de los cuales se puede obtener agua potable, a un relativo bajo costo. En el texto analizan la eficiencia térmica y exegética en un proceso de destilación solar activa de doble pendiente con circulación forzada, de forma que se pueda determinar el potencial de trabajo útil del sistema. Dentro de los resultados más importantes está un rendimiento térmico diario de la destilación solar entre el 13,55 al 31,07% y un rendimiento exegético variando entre 0,26 y 1,34%.

En [5], el Instituto de Estudios Políticos y Relaciones Internacionales IEPRI, de la Universidad Nacional de Colombia y su aliado Solaris SAS propusieron la potabilización por destilación solar de agua proveniente de una de las fuentes de la zona. La destilación está basada en el principio del efecto invernadero (evaporación y condensación del agua) para separar el líquido de los residuos y eliminar virus, bacterias y otros contaminantes. Este sistema fue propuesto con el fin de aprovechar la altísima radiación solar de Uribía, de 6Kwh/m^2 [5]. En la solución se le dio prioridad al intercambio de saberes y a la participación: las decisiones finales fueron tomadas junto con la comunidad después de caracterizar las fuentes de agua para escoger

la mejor, integrando el concepto estatal de agua y las creencias ancestrales Wayuu. Hubo un acercamiento a la comunidad para presentar el proyecto, demostrando el funcionamiento de un destilador solar piloto alimentado manualmente, también se visitaron y evaluaron las fuentes de agua de la zona. Después de socializar los resultados de la evaluación se decidió potabilizar el agua de mar aprovechando la cercanía de las rancherías a la playa, pues la misma estructura del suelo, sirve de filtro para los residuos sólidos.

Así las cosas, se procedió a construir un pozo profundo y se instaló una bomba solar en una reserva subterránea del mar y se levantó una caseta de dos pisos para albergar el tanque de almacenamiento y dos neveras donadas. Se construyeron 12 destiladores de 2.5 m² de alimentación automática para proveer finalmente agua potable a un tanque de distribución. En la figura 1 se muestra un esquema general del proyecto implementado.

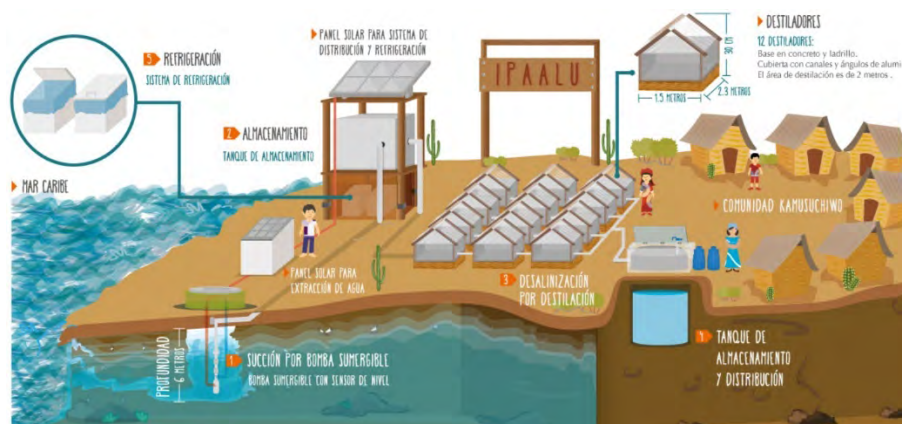


Figura 1. Potabilización de agua por destilación solar-comunidad Kamusuchiwou

Por otro lado, [6] estudia el comportamiento de dicho prototipo, con el fin determinar su eficiencia en un proceso de desalinización de agua de mar extraída de las playas de Bocagrande, con el fin de proponer una solución de fácil operación, económica y sostenible, enfocada en los habitantes de la isla de Tierra Bomba, pero pudiendo a su vez convertirse en una solución practica para el auto abastecimiento de agua en regiones con escasez de agua. Es preciso anotar que en dicho proyecto intervienen también intervienen las organizaciones mencionadas en el párrafo anterior, IEPRI y Solaris.

El análisis se basó en las pruebas realizadas a un prototipo de destilador solar de 1 metro de ancho, 1,5 metros de longitud, usando láminas de vidrio de 5 mm de espesor, empaquetadura en aluminio, bandeja con acero inoxidable y soporte en estructura metálica; periódicamente se monitoreaba el sistema, haciendo mediciones del agua producida, así como la radiación solar y temperatura necesaria para que ocurra el proceso de evaporación.

Frente a las características del agua destilada obtenida, los autores presentan lo siguiente: se logró una disminución significativa de la salinidad, así como del pH y disminución de la turbiedad. La producción de agua promedio fue de 214,89 ml/día, la temperatura media y las radiaciones solares máximas y mínimas necesarias para la evaporación fueron de 34 °C, 700 W/m² y 684,29 W/m², respectivamente. Para los autores, el sistema propuesto es eficiente y tiene las ventajas de ser económico y de fácil operación [6].

De igual forma, [7] presentan los resultados de un proyecto adelantado en la ciudad de en Tipaza, Argelia, en donde se mide el efecto de los parámetros internos de un destilador solar de doble pendiente. Para tal efecto se realizaron experimentos en distintas condiciones, encontrando como resultado que la tasa de producción de destilado aumenta cuando disminuye la diferencia entre la temperatura del agua y el vidrio, y esta se ve influenciada por aspectos como la presencia de vientos y la variación en la cantidad de energía solar difusa debido a los cambios climáticos. El dispositivo probado tuvo un rendimiento de agua destilada de 4 L / m² / día.

En la misma línea, [8] propone el diseño, construcción y evaluación de un prototipo de destilador solar, con un área de 0,15 m², usando un vidrio transparente de 3mm de espesor con un ángulo de inclinación de

170. Se hicieron pruebas de volumen, temperatura, conductividad, radiación solar, pH, cloruros, sólidos disueltos, tanto al agua salobre como a la obtenida con el prototipo. Según los resultados obtenidos, el agua obtenida cumple con los estándares de calidad de agua potable, obteniendo una eficiencia térmica del prototipo del 35 %.

Otro proyecto similar es el de [9], donde validan el diseño de un dispositivo con la capacidad de producir medio litro de agua en un tiempo aproximado de 4 horas, dependiendo de las condiciones climáticas, y plantea a su vez unas posibles mejoras para la construcción de otros prototipos, como son: manejo de la relación entre el área de la bandeja y la altura, de forma que se optimice la eficiencia; evitar las altas corrientes de aire dado que esto hace que se dé un efecto de refrigeración; uso de materiales resistentes al desgaste, dado que el dispositivo está expuesto al medio ambiente; mejorar la transferencia de calor a partir del uso de bandejas con rugosidades.

[10] desarrollaron una propuesta de desalinizador mediante la implementación de energía solar para el consumo humano, enfocado en las zonas costeras de Colombia, y en el cual concluyeron que la eficiencia teórica del sistema propuesto es del 50 %, y que la inversión en proyectos de este tipo puede ser rentable en el mediano plazo. Así mismo encontraron que la eficiencia del sistema depende de factores como los climáticos, y además que el agua obtenida no se ajusta a los requerimientos para ser considerada potable, dada la manipulación que se da en su proceso de obtención, por lo cual se requeriría de un proceso posterior de cloración.

Por su parte, [11] llevan a cabo la evaluación bajo distintos parámetros fisicoquímicos de un sistema desalinizador de aguas duras. Como resultados los autores estimaron que el 100 % de las sales disueltas en el agua tratada podían ser retiradas y que la eficiencia del sistema es del 69,24 %; así mismo concluyen que este proceso de potabilización debe ser complementado con la desinfección y neutralización del agua resultante.

Un trabajo similar es el de [12] enfocado en apoyar el desarrollo social de zonas rurales que presentan como característica la falta de acceso al agua potable. Para tal efecto planteo diseño un dispositivo el cual fue puesto a prueba por dos meses, evaluando su eficiencia mediante un software específico. El dispositivo registro una producción de 2 litros /día/m² con una radiación mínima de 100Wh/m², y de 5 litros / día /m² con una radiación máxima de 800 Wh/m²; así mismo, el agua resultante fue sometida a pruebas fisicoquímicas las cuales mostraron que esta era apta para consumo humano.

Igualmente, [13] elaboró una propuesta a partir de un destilador solar con el que pretendía probar dicho dispositivo para ser usado por una familia de 3 a 4 personas, y obtuvo una producción de 3 litros / m² / día, y agua destilada con resultados satisfactorios en las pruebas fisicoquímicas realizadas.

En su proyecto de investigación [14] evalúan la eficacia de dos dispositivos utilizados para el tratamiento de aguas residuales de dos orígenes distintos. Como resultados de las pruebas físico-químicas a las que fueron sometidas el agua obtenida por el proceso de destilación solar, encontraron que la utilización de este tipo de dispositivos es pertinente para mejorar la calidad de aguas residuales.

[15] desarrolla una propuesta similar, con el valor agregado de estar integrados con un concentrador parabólico el cual permite optimizar la productividad; de igual manera, se optimizó la geometría del dispositivo final con el fin de mejorar el diseño debido a una mejor relación costo - beneficio. El agua producida tuvo resultados favorables en las pruebas realizadas, cumpliendo con la normatividad para consumo humano.

En [16] se muestra cómo se construyó un desalinizador solar y se validó su funcionamiento; el autor concluye entre otras cosas que el agua destilada presenta bajos niveles de conductividad eléctrica y de sales residuales. De igual forma obtuvo una eficiencia relativamente alta, aunque la misma depende mucho de las condiciones ambientales, y afirma que este tipo de dispositivos con baratos, de fácil manejo, instalación y mantenimiento.

[17] lleva a cabo un estudio de factibilidad técnica para un sistema de desalinización basado en energía solar. Dicho sistema fue sometido a simulaciones matemáticas para obtener un rendimiento teórico, el cual se comparó con el rendimiento real a partir de pruebas realizadas por 15 días en una comunidad de La Guajira, Colombia. Los resultados arrojaron una capacidad de producción de agua desalinizada de 0,803 litros / hora, con una baja concentración de cloruros, lo cual según el investigador se considera suficiente para generar volúmenes de agua potable a un bajo costo y de forma eficiente.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 La destilación

La destilación es un proceso utilizado para separar uno o más componentes de una mezcla líquida, este método se vale de los fenómenos de ebullición y condensación para lograr este fin. Para separar un componente, la mezcla se calienta hasta la temperatura de ebullición de la sustancia en cuestión, el vapor resultante es condensado, es decir, se somete a un proceso de disminución de temperatura hasta que retorna a la fase líquida [18]. Este autor define la destilación como el método de separación más importante en la industria; sugiere además que es muy eficiente para la realización de separaciones de alta pureza, con un consumo fijo de energía y un mayor número de etapas de equilibrio.

Por otro lado, para [19] el proceso de destilación debe cumplir con varias condiciones para sea exitoso. En primer lugar, las fases líquidas y gaseosas deben estar presentes en el proceso; en segundo lugar, los componentes de la mezcla deben tener puntos de ebullición diferentes; finalmente, las dos fases deben ser separables, ya sea por gravedad u otros métodos mecánicos.

3.1.1 Destilación solar

La energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. A pesar de tener un coste energético nulo y escasa inversión necesaria, su baja rentabilidad reside en su escasa producción por metro cuadrado de colector al destilarse tan solo unos litros al día en el caso de condiciones climatológicas favorables, por lo tanto, no se han desarrollado a gran escala en lugares con un consumo elevado de agua dulce [7]. Hay varias formas de producir agua dulce usando la energía solar, en este párrafo nos ceñiremos a la destilación por colectores.

El principio básico es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un cristal transparente, en cuyo fondo tenemos agua salada en reposo. Dependiendo de la radiación solar y otros factores como la velocidad del viento (que enfría el vidrio exterior), una fracción de esta agua salada se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Como dicho vidrio está colocado inclinado, las gotas caen en un canal que va recogiendo dicho condensado evitando que vuelvan a caer en el proceso de condensación a la lámina inferior de salmuera. Aunque pueden utilizarse técnicas de concentración de los rayos solares apoyándose en lentes o espejos (parabólicos o lisos), no suelen compensar las mayores pérdidas de calor que ello acarrea y su mayor coste económico [7]; la energía solar también puede ser la fuente de energía de un proceso de destilación, incluso de producción eléctrica para pequeñas instalaciones de ósmosis inversa [20].

3.1.2 Principios básicos de un destilador solar

Un destilador solar es un dispositivo que utiliza la energía del sol para producir agua potable a partir de agua salobre o contaminada. Para [20], la energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. El principio de funcionamiento es similar al ciclo natural del agua, la luz del sol aumenta la temperatura del agua no potable y con el paso del tiempo esta empezará a evaporarse, luego, el vapor de agua es condensado gracias a la acción del aire fresco, el agua producida mediante este proceso es apta para el consumo humano [20].

Frente a aspectos específicos del sistema de funcionamiento, [21], sugiere que la bandeja para el agua contaminada debe ser de color negro con el fin de maximizar la absorción de la radiación solar, también

menciona que la misma debe tener una anchura adecuada y poca profundidad para que el agua quede más expuesta al ambiente, dado que, como conclusión del estudio que realicé, se tiene que la velocidad de evaporación es directamente proporcional al aumento de la temperatura del agua y el área de la misma expuesta al aire.

De igual forma, el autor considera importante que la superficie de vidrio utilizada cree un ambiente hermético, de forma que el vapor generado en el proceso no escape, para su posterior proceso de condensación. La pared de vidrio permite la condensación debido a que se encuentra unos grados por debajo de la temperatura del agua contaminada. Así mismo, el cristal debe tener una pendiente que facilite la recolección y transporte del agua dulce hasta el sistema de drenaje, el cual constituido por un conjunto de canales y tubos que recolecta y transporta el agua potable hasta un tanque de almacenamiento [21].

4. MÉTODO

Por enfoque, la metodología que se utilizará es de tipo exploratoria, pues se realizarán estudios que permitan conocer los procesos y las necesidades que intervienen en el desarrollo de este proyecto; también es de tipo descriptiva ya que se realiza la descripción del proceso que se llevarán a cabo a partir de la puesta en marcha de este proyecto. Además, es investigación aplicada porque se va a desarrollar el prototipo a partir de la aplicación de conocimiento adquirido en el área de ingeniería y diseño.

Por tipo, el presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo, porque describirá cuánta energía solar se consume para que un litro de agua se transforme en agua apta para consumo. Así mismo, caracteriza las variables que intervienen en este proceso y el análisis del agua antes del proceso de destilación y después de él. Etapas para el desarrollo del proyecto:

1. Observación e investigación: en esta etapa se llevaron a cabo las siguientes actividades:
 - Revisión bibliográfica: se recolectó información de fuentes secundarias, como libros y artículos científicos, tomados de bases de datos académicas.
 - Planteamiento del problema: en esta etapa se tomaron como referentes los estudios analizados en la revisión bibliográfica.
 - Elaboración de estado del arte: se tomaron como referentes proyectos de investigación relacionados con el diseño y construcción de dispositivos solares para la destilación, los cuales tuvieron resultados obtenidos a partir de su implementación en entornos reales.
2. Identificación de necesidades: para tal efecto se hizo un análisis de la necesidad del diseño del destilador como método para la obtención de agua potable, enfocado en regiones vulnerables del departamento.
3. Realizar estudio técnico: en esta etapa se hizo el análisis desde la ingeniería y el diseño industrial, con el fin de obtener un boceto inicial del prediseño.
4. Diseño de prototipo: se desarrolla un diseño con base en el boceto inicial, el cual es puesto a evaluación para determinar puntos de mejora y pasar así al diseño final.
5. Construcción de prototipo: etapa pendiente; esta hace parte de la entrega final del proyecto. En este texto solo se entregan resultados hasta la fase de diseño final.
6. Análisis de datos: etapa pendiente; en esta se tomaron medidas de desempeño real del dispositivo, como lo son la producción diaria de líquido, eficiencia de uso de energía, etc.

Es preciso aclarar que el diseño fue desarrollado a partir de la necesidad de la creación de una herramienta para la realización de pruebas precisas y viables, enfocándonos en la optimización de los procesos de destilación a partir de la radiación solar y la condensación del agua, en el trópico, con la posibilidad de monitoreo a distancia de los resultados, generados por este.

El proceso de diseño se basó en diversas metodologías y métodos sistémicos de diseño, en el que se mezclaron en diferentes etapas, iniciando con el MGA [22], para levantar los requerimientos y ver posibles

soluciones, así como el mapa de empatía [23, 24] para poder definir las necesidades del proyecto, hasta terminar en un proceso iterativo usando la metodología Design Thinking [25-27].

De igual manera, para el desarrollo y validación de la propuesta inicial de diseño se tuvieron en cuenta principios básicos de diseño en ingeniería, a partir de los aportes teóricos de distintos autores [28, 29, 30], lo cual permitió establecer unos criterios básicos o parámetros para determinar las características funcionales y estéticas del diseño final, así:

- El dispositivo debe ser de fácil transporte y bajo peso, dado el uso que se le pretende dar en regiones generalmente apartadas y de difícil acceso.
- Debe tender a la menor cantidad de herramientas posibles para su armado.
- El dispositivo debe estar constituido por piezas fáciles de conseguir, estandarizadas, fáciles de producir y disponibles en cualquier mercado.
- El diseño debe obedecer a un dispositivo con el más bajo costo de producción posible.
- Debe ser un dispositivo de fácil manejo, con un bajo nivel de conocimiento técnico necesario para su ensamble y operación.
- Las piezas que lo constituyan deben ser durables, dado que su funcionamiento será en ambientes exteriores

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El dispositivo para el tratamiento de agua tiene como meta aliviar el estrés hídrico que viven muchas comunidades vulnerables en Colombia, en conformidad con los Objetivos del Desarrollo Sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas. La mayoría de los grupos desfavorecidos se encuentran en territorios apartados, por ende, es adecuado el empleo de destiladores solares para obtener agua potable, como lo menciona [20] estos métodos hoy por hoy no son competitivos económicamente, tan solo en lugares aislados de suministro eléctrico y de agua es factible pensar en estas instalaciones.

Lo anterior dado que, si bien los costos de fabricación, instalación y operación de este tipo de sistemas son bajos, generalmente su desempeño en términos de cantidad de agua potabilizada también lo es, de allí que no sean útiles sino en aquellas regiones que presentan este déficit y tienen condiciones ambientales adecuadas.

El diseño propuesto pretende ajustarse precisamente a las restricciones antes mencionadas, con el fin que sea lo más económico posible, de fácil manejo, fácil instalación y mantenimiento. En la figura 2 se presenta un diagrama de flujo que representa el funcionamiento del destilador solar propuesto.

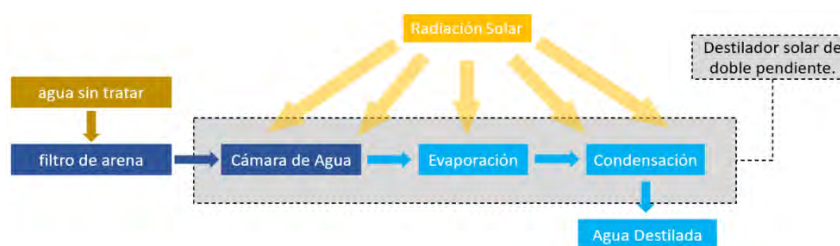


Figura 2. Funcionamiento destilador solar

En el caso particular del proyecto investigativo en cuestión, el hecho que tenga una doble pendiente favorece el desempeño del prototipo. El diseño final, validado por especialistas, se muestra en la Figura 3.

Se aclara que, si bien este es el prototipo planteado, derivado de la fase de diseño, una vez se realicen las pruebas piloto es probable que se tengan que llevar a cabo cambios en el mismo, dependiendo de los resultados obtenidos en pro de mejorar su eficiencia y facilitar su manejo. En la Figura 4 se muestra la imagen frontal del prototipo propuesto.



Figura 3. Destilador solar de doble pendiente

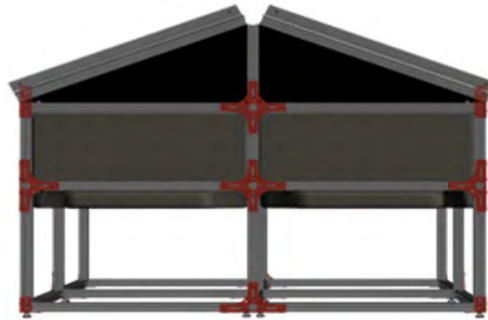


Figura 4. Vista Frontal prototipo

Se debe aclarar que las piezas empleadas para armar el prototipo fueron diseñadas teniendo en cuenta los principios de diseño en ingeniería mencionados en párrafos anteriores, de allí que son fáciles de obtener, o en su defecto fabricar, y para el proceso de ensamble del prototipo, una vez se construya, se tuvo en cuenta el uso del mínimo de herramientas y piezas posibles. En la Figura 5, se muestra de forma más detallada el esquema de funcionamiento de los vidrios empleados en el dispositivo, y en la Figura 6 se observa el proceso de funcionamiento completo del dispositivo.

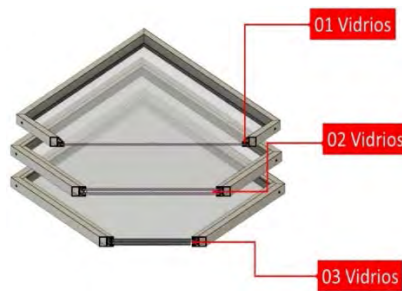


Figura 5. Configuraciones de vidrio a usar

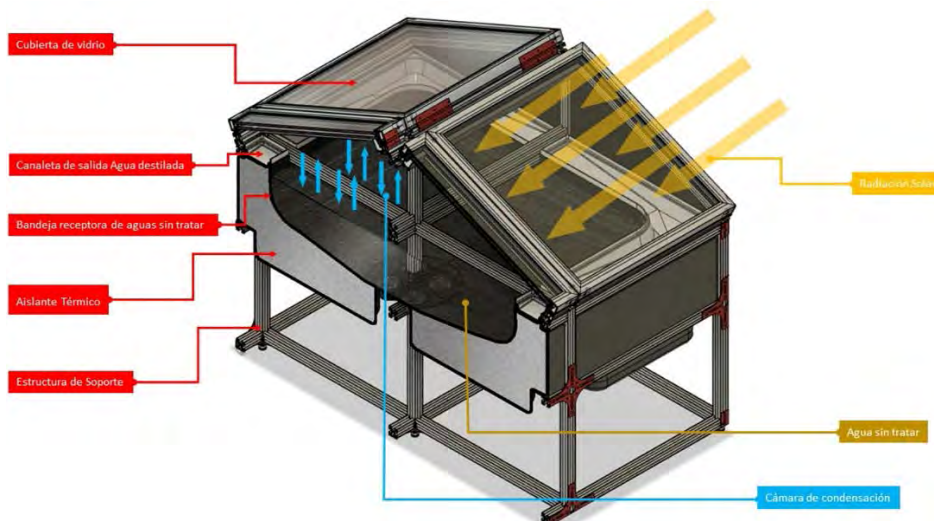


Figura 6. Funcionamiento dispositivo

6. CONCLUSIONES

Los procesos de investigación llevados a cabo en las IES del país deben enfocar sus esfuerzos en la solución de problemáticas reales, de tal forma que los resultados obtenidos impacten de forma positiva la sociedad. Para el caso particular del presente proyecto, se tuvo en cuenta lo antes mencionado, por lo cual se pretendía apuntar a una solución desde la ingeniería y el diseño de una problemática tan compleja como es la ausencia de agua potable en muchas regiones de Colombia. Se espera, por tanto, que sirva como insumo para posibles implementaciones del prototipo propuesto, así como futuras investigaciones en esta línea que posibiliten el diseño y construcción de equipos tecnológicos cada vez más eficientes y económicos.

El sistema de destilación solar es ideal para zonas de difícil acceso, donde no es viable o factible implementar acueductos, o sale muy costoso, dada la densidad poblacional. Sin embargo, es claro que el desempeño de este tipo de equipos no es muy alto, y, por tanto, es útil como una medida alternativa o complementaria, mas no como una solución definitiva a la escasez de agua en las regiones; se debe pensar en inversiones significativas en temas de infraestructura e las mismas si se pretende solucionar de forma definitiva la problemática planteada.

De acuerdo con diversos estudios el método de destilación con energía solar es capaz de producir agua de muy alta calidad, libre de contaminación orgánica e inorgánica, de allí que se convierte en una alternativa interesante cuando los volúmenes requeridos no son muy altos; además, dado la practicidad y fácil manejo de este tipo de dispositivos, son una alternativa viable, aunque no definitiva como se mencionó anteriormente.

Dentro de las ventajas del acceso a agua potable, están el hecho de mejorar notablemente la calidad de vida de los hogares; además, la obtención de agua potable tiene relación directa en la disminución del índice de enfermedades crónicas, disminución en los conflictos, disminución de la deserción escolar y aumento en la productividad.

Es pertinente decir que dentro de la revisión bibliográfica se encontraron muy pocos trabajos frente a la temática estudiada desarrollados en el país, lo cual presupone que este es un campo por explorar que requiere de más investigación y del aporte de las distintas organizaciones que puedan aportar para la solución de problemáticas relativas al agua potable; es evidente que se requiere del esfuerzo en investigación por parte de las IES de país, de forma que como se dijo anteriormente, se puedan formular y ejecutar proyectos que impacten las comunidades.

Así las cosas, es de vital importancia que los procesos de investigación formativa que se llevan a cabo en las distintas instituciones de educación superior del país enfoquen parte de sus esfuerzos en la solución de problemáticas relativas a las comunidades; en este sentido proyectos como el que se presentan en este documento validan su importancia en la medida en que están direccionando el conocimiento adquirido en el procesos de formación en ingeniería hacia la atención de necesidades de primer orden en las regiones. Se espera por lo tanto que los resultados obtenidos sirvan como insumo en futuras investigaciones sobre la temática tratada.

REFERENCIAS

- [1] Lopera C. (2019). Ciudad inteligente y sostenibilidad: un análisis bibliométrico. En Lopera C. (ed.), *Sostenibilidad, Cultura y Sociedad*. Fondo Editorial Pascual Bravo.
- [2] Rojas I. et al. (2017). Estrategias de desarrollo económico local para el municipio de Girardota. *Revista CEA* 3(6), 29-45.
- [3] Arenas J. et al. (2020). Industria 4.0 para la competitividad en el sector textil, confección, diseño y moda de Medellín: aplicación del escaneo 3D para estudios antropométricos. En Lopera C. (ed.), *Ecociudades, una experiencia urbana*. Fondo Editorial Pascual Bravo.
- [4] Sethi A. y Dwivedi V. (2013). Exergy analysis of double slope active solar still under forced circulation mode. *Desalination and Water Treatment* 51 (40-42), 7394-7400.
- [5] Minciencias. (2014). Potabilización de agua mediante destilación solar en la comunidad Kamusuchiwou, Alta Guajira. Recuperado: <https://ideasparaelcambio.minciencias.gov.co/sites/default/files/Implementacion-Uribia.pdf>

- [6] Pérez J. y Salazar A. (2016). Análisis del comportamiento de un prototipo de destilador solar en la ciudad de Cartagena. Trabajo de grado. Universidad de Cartagena.
- [7] Aburideh H. et al. (2012). An Experimental study of a solar still: application on the seawater desalination of fouka. *Procedia Engineering* 33, 457-484.
- [8] Bustinza C. (2020). Sistema de destilación solar para purificación de aguas salobres. Trabajo de grado. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Bajo Cusco.
- [9] Luque F. y Romero M. (2017). Diseño y construcción de un destilador de agua salada alimentado por medio de energías renovables. Trabajo de grado. Universidad Piloto de Colombia.
- [10] Blanco Y. y Gutiérrez A. (2019). Desarrollo de un prototipo desalinizador de agua de bajo costo, mediante la implementación de energía solar para el consumo humano. Trabajo de grado. Universidad de Santander.
- [11] De Lima A. y Orozco S. (2019). Evaluación de la eficiencia del desalinizador por evaporación en el tratamiento de agua subterránea en Barranquilla en dos escenarios: Universidad de la Costa y lavadero de carros. Trabajo de grado. Corporación Universidad de La Costa.
- [12] Jiménez K. (2020). Purificación de agua local para consumo humano con un destilador solar de alta eficiencia para entornos domésticos rurales áridos. Trabajo de grado. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- [13] Alban J. (2015). Destilador solar para potabilizar el agua para una familia de 3 a 4 personas en el sitio bajo alto, cantón el guabo, provincia de El Oro. Trabajo de grado. Universidad Técnica de Machala.
- [14] Sánchez M. y Yagkug K. (2020). Eficacia de un destilador solar en el tratamiento de aguas residuales de la provincia de Trujillo. Trabajo de grado. Universidad Privada del Norte.
- [15] Caro A. (2020). Desarrollo y evaluación de destiladores solares de agua de alto rendimiento. Disertación Doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [16] Torres C. (2017). Diseño y validación de un prototipo de desalinizador solar. Trabajo de grado. Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia.
- [17] Aguilar J. (2020). Sistema descentralizado de desalinización de agua basado en energía solar para generar volúmenes de agua segura en comunidades indígenas de La Guajira. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- [18] Halvorsen I. y Skogestad S. (2000). Distillation Theory. *Encyclopedia of separation Science*. Academic Press Ltd.
- [19] Seader J. y Henley E. (2006). *Separation process principles*. John Wiley.
- [20] Valero A. et al. (2001). La desalación como alternativa al PHN. Universidad de Zaragoza.
- [21] McCluney W. (1984). *Solar distillation of water*. University of Central Florida.
- [22] Ortegón E. et al. (2005). Serie Manuales, Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas. CEPAL-ILPES.
- [23] Ferreira B. et al. (2015). Designing Personas with empathy map. En Conferencia Internacional sobre Ingeniería de Software e Ingeniería del Conocimiento. Pittsburgh, USA.
- [24] Solórzano, A. (2021). Mapa de empatía en docentes del Centro de Atención Múltiple sobre la infraestructura educativa en San Felipe, Guanajuato. *Divulgare* 8(15), 8-15.
- [25] Brown, T. (2008). Design thinking. *Harvard business review* 86(6), 84-95.
- [26] Vergara, M. et al. (2014). Design thinking: Cómo guiar a estudiantes, emprendedores y empresarios en su aplicación. *Revista Ingeniería Industrial* 35(3), 301-311.
- [27] Madrigal G. et al. (2018) *Manual de design thinking*. Universidad Tecnológica Santa Catarina.
- [28] Cross N. (2002). *Métodos de diseño: estrategias para el diseño de productos*. Limusa Wiley.
- [29] Pahl G. et al. (2007). *Conceptual design for engineers*. Springer.
- [30] Vilchis L. (1998). *Metodología del Diseño. Fundamentos Teóricos*. Editorial Claves Latinoamericanas.

Pequeñas centrales hidroeléctricas como alternativa para la obtención de energía en entornos rurales en Colombia: Un análisis teórico

Santiago Vásquez Carmona¹
Iván Darío Rojas Arenas²
Mariana Leandra Agudelo Calle³
José Alejandro Durango Marín⁴
Institución Universitaria Pascual Bravo
Colombia

La energía eléctrica es un recurso fundamental para la sociedad, al punto que es difícil pensar en términos de desarrollo en las posibilidades que tienen las comunidades cuando no tienen acceso a este recurso. Lo anterior se debe a condiciones propias de algunas regiones, lo cual no permite una fácil conexión al sistema de abastecimiento de energía, así como a la falta de una planeación adecuada para el desarrollo de alternativas viables, con el fin de dar solución a esta problemática. En Colombia, estas zonas están ubicadas en entornos rurales que, generalmente, presentan serias deficiencias de infraestructura vial, condiciones topográficas difíciles, bajas densidades poblacionales e ingresos per cápita relativamente bajos. En este trabajo se presenta un análisis teórico de las pequeñas centrales hidroeléctricas PCH como alternativas viables para la generación de energía eléctrica en entornos rurales. Se toman dos enfoques: 1) desde un breve estudio de los proyectos e investigaciones que se han desarrollado en el país, y 2) desde las consideraciones generales para el diseño y ejecución de proyectos de este tipo. De esta manera se plantea un estudio descriptivo basado en una revisión de la literatura, así como la aplicación de una encuesta en una vereda del municipio de Guarne, Colombia, para indagar aspectos derivados de la posible implementación de una PCH en dicha zona. Las respuestas se analizaron por medio de diagramas de Pareto. Se aclara que este capítulo es resultado de la primera fase del proyecto de investigación, donde se pretende diseñar una PCH para la zona mencionada, teniendo en cuenta los requisitos técnicos de ingeniería, así como los distintos estudios de impacto necesarios. De igual manera se espera que esta investigación sirva como insumo para futuros trabajos en la misma línea.

¹ Ingeniero Mecánico.

Contacto: sa.vasquez@pascualbravo.edu.co

² Magister en Gestión de la Innovación Tecnológica.

Contacto: ivan.rojasar@pascualbravo.edu.co

³ Ingeniera Industrial.

Contacto: m.agudelo1072@pascualbravo.edu.co

⁴ MBA.

Contacto: ja.durango@pascualbravo.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La energía es un factor importante para el crecimiento económico; los desarrollos tecnológicos dependen directamente de la asequibilidad a la energía que tienen las comunidades. Teniendo en cuenta que los recursos y el medio ambiente son estructuras finitas y que son sobre explotados, garantizar la energía a toda la población mundial no es una tarea fácil. Muchas comunidades de países en vía de desarrollo vienen trabajando con la generación de energía renovable para las zonas no interconectadas, mitigando el calentamiento global y evitando extinguir los recursos utilizados en la generación de energías convencionales.

En Colombia, un país muy desigual, con desbalances entre regiones muy notables, el tema del acceso a la energía eléctrica para algunas comunidades, sobre todo en las zonas rurales, es bastante complejo, de allí que, por temas económicos, de densidad poblacional o de dificultades logísticas derivadas del entorno físico, pensar en soluciones como plantas hidroeléctricas suena casi utópico, de allí la necesidad de pensar en alternativas más baratas, sostenibles y viables para estas zonas.

En este sentido, en el presente trabajo se plantea un análisis teórico inicial sobre las pequeñas centrales hidroeléctricas PCH, como una alternativa para la generación de energía en entornos rurales del país, de forma limpia y con relativos bajos costos, además aprovechando el hecho de la riqueza en fuentes hídricas de Colombia, lo que le da un potencial enorme para el uso de este tipo de tecnologías.

Es preciso anotar que esta primera publicación hace parte de un proyecto de maestría en curso, en el cual se pretende diseñar una PCH, basada en una turbina de Francis; dicho diseño se encuentra en proceso y se espera poder publicar pronto los resultados obtenidos.

Así las cosas, el estudio se dividió en tres etapas: análisis de condiciones convencionales, evaluación de la aceptación de la comunidad implicada, y diseño de la PCH. En estos momentos el proyecto está en la etapa tres, se tienen diseños iniciales, pero falta la validación de estos por parte de especialistas.

En esta primera entrega dentro del proceso investigativo, se hace una aproximación al estado del arte, mostrando un breve repaso de las historias de las PCH en Colombia, para luego presentar algunas consideraciones generales para su diseño y construcción. Posteriormente se hace un pequeño repaso acerca de investigaciones similares, llevados a cabo tanto en el entorno nacional como internacional.

Los resultados se obtuvieron a partir de una encuesta realizada en la comunidad de la vereda Piedras Blancas, del municipio de Guarne, Antioquia. Se presentan algunas conclusiones referentes al proceso teórico investigativo y a los resultados de la encuesta. Se espera que este proyecto sirva como punto de partida en futuras investigaciones en torno a la obtención de energía eléctrica para comunidades rurales, de forma económica y sostenible.

2. MARCO CONCEPTUAL

La historia de las PCH en Colombia se remonta al año 1889 dado que en las ciudades de Bogotá, Bucaramanga y Cúcuta se inició con su instalación, para abastecer las grandes fincas que existían en la época; posteriormente, se construyeron otras en Santa Marta en 1898, las cuales alcanzaron aprovechamientos de hasta 45 MW registrados entre 1930 y 1960. Sin embargo, este tipo de proyectos decayeron, ya que por el escaso mantenimiento se fueron desechando, a la vez que el Gobierno empezó a impulsar la construcción de grandes centrales hidroeléctricas [1].

Sin embargo, a raíz de una crisis energética que acaeció en 1970 se realizaron nuevos proyectos de PCH que fueron apoyados por el gobierno, pero que no tuvo los resultados esperados. Fue solo hasta la nueva crisis causada por el fenómeno del niño, que conllevó al racionamiento eléctrico en los años 90, se volvieron a impulsar los proyectos en regiones como Nariño, Meta, Choco, Cauca y La Guajira, lo que desde entonces se promueve a través de leyes para emplear fuentes no convencionales de energía [1].

Para 2020 se calculaba que cerca del 4,7% de la generación de energía eléctrica en el país, provenía de PCH [2], las cuales, según su capacidad, se dividen en despachadas centralmente (capacidad neta mayor o igual a 20 MW) y no despachadas centralmente (menos de 20 MW).

3. MARCO REFERENCIAL

A nivel nacional se tienen algunas investigaciones que dan cuenta de proyectos de diseño y construcción de PCH, como posible solución a problemáticas energéticas; [3], por ejemplo, plantean el diseño de una PCH para el municipio de Pisba, Boyacá, con el objetivo de visualizar la importancia de utilizar fuentes renovables para el suministro de energía y que los resultados de este trabajo sean utilizados como una herramienta para la solución del suministro energético confiable, así como guía para en el desarrollo de proyectos similares. Además, concluyeron que La quebrada Farasí del municipio de Pisba tenía un caudal suficiente (0,65m³ /s con una duración porcentual del 52,33% anual) para generar una potencia de entrada que le daría una solución factible a la demanda energética de la zona.

La PCH propuesta tendría un costo aproximado de 2.094.665.747,63 COP, con retorno de la inversión, calculado a partir de una Tasa Interna de Retorno TIR del 0,12 \$, un Valor Actual Neto VAN mayor a cero y una Tasa de Interés de Oportunidad TIO del 0,10, lo que hace viable el proyecto desde el punto de vista financiero a un periodo de planeación de 10 años. Los autores además comentan que el proyecto es amigable con medio ambiente, ya que no se generan residuos contaminantes en el aire, el agua o la tierra y no requiere la utilización de combustibles fósiles [3].

Otros autores [4], proponen un estudio de prefactibilidad para la instalación de una PCH en el embalse de Sisga, Cundinamarca; los autores concluyeron que dicho proyecto era viable, dadas las características topográficas e hidrológicas de la zona, así como la capacidad energética derivada del caudal calculado y la altura de la caída del agua (349,3 M). Afirman además que los costos de instalación y operación son pertinentes, y que los posibles impactos ambientales son muy bajos. Sumado a lo anterior, se tenía por ser un cuerpo de agua ya represado, no se presentarían cambios significativos en fauna y flora.

En la misma línea, [5] desarrollo un estudio con el fin de determinar los impactos ambientales, sociales y económicos de las PCH en Antioquia, región que ha sido la más grande generadora de energía eléctrica del país. Como conclusión, se tiene que las PCH son alternativas muy viables dada su baja inversión, en comparación con los costos e impactos derivados de una central hidroeléctrica. Sumado a lo anterior, el autor afirma que el hecho que trabajen con los cauces de los ríos mitiga el impacto ambiental al no requerirse la inundación de terrenos y posible reubicación de personas. Se tiene además que este tipo de proyectos traen beneficios económicos a las comunidades, dadas las posibles fuentes de empleo que se generan con su construcción y posterior puesta en marcha.

De igual manera, [6] llevan a cabo una investigación similar a la anterior, enfocada en el Departamento de Caldas; dentro de las conclusiones a las que llegan se tiene que en el país aún se presentan ambigüedades frente el tema de la clasificación de centrales, lo que hace que en ocasiones no se mida de forma adecuada su impacto. De igual forma, los autores afirman que es prioritario el consenso con las comunidades implicadas, lo cual muchas veces no ocurre debido a que priman los intereses de las grandes constructoras dedicadas al desarrollo de este tipo de proyectos, lo cual se hace aún más evidente en zonas que han sido asoladas por el fenómeno de la violencia, lo que a su vez llega a generar resistencia por parte de la comunidad.

Continuando con la revisión bibliográfica, [7] analizan las diferentes etapas requeridas para el desarrollo de un proyecto de PCH, en donde se enumeran los requerimientos básicos para el diseño e implementación de este tipo de proyectos. Para tal efecto, hicieron una recopilación bibliográfica a nivel nacional e internacional, para construir un estado de la cuestión. Dentro de las conclusiones a las que llegan, se tiene que en el país no se tienen suficientes incentivos para proyectos de este tipo, aunque se pueden aplicar los existentes para energías renovables de menos de 20 MW, las exenciones de impuestos al clasificarse como proyectos de innovación y desarrollo, y bonos MDL. Las turbinas hidráulicas que ofrecen mayores ventajas operativas en PCH a filo de agua son las turbinas de acción debido a su excelente rendimiento con cargas

parciales, lo cual es una condición típica de las PCH. Sin embargo, el tipo de turbina a seleccionarse dependerá de las condiciones específicas de cada proyecto.

El planteamiento de las etapas para tener en cuenta para la ejecución de proyectos de puesta en marcha de las PCH permitió establecer que la etapa más importante en su realización es la de estudios básicos de ingeniería y planteamiento del diseño, que, aunque son las menos costosas (alrededor de 10% de la inversión total), son las que determinan si el proyecto será exitoso en la etapa de construcción y puesta en marcha. Si no se les da la suficiente importancia y profundidad a estos estudios, se tendrá un sobre costo que puede afectar la rentabilidad del proyecto o peor aún, ocasionar que se abandone la iniciativa. Para los autores, el futuro de las PCH en Colombia es prometedor debido al gran potencial hidro-energético existente, sin embargo, es necesario que se establezcan mecanismos legales y políticos que permitan atraer la atención de posibles inversionistas [7].

Aportando a lo anterior, [8] realizan un estudio para el diseño y construcción de una PCH en el municipio de Liborina, Antioquia, llevando a cabo estudios de tipo técnico, de mercado, económico –financiero y social-ambiental; dentro de las conclusiones a las que llegan se tiene que proyectos de este tipo son soluciones energéticas importantes para zonas no interconectadas, ya que pueden llegar a cubrir la demanda de forma total o parcial. Así mismo, las PCH representan una fuente de energía renovable, limpia y sostenible, y son competitivas como alternativas de generación en sectores como el minero o la industria en general.

Así mismo, [9] hacen un análisis del panorama de las energías renovables en el país, presentando datos interesantes, como el hecho que un poco más del 6% de la generación de electricidad se da a partir de energías renovables, sin incluir las grandes hidroeléctricas. Los autores aducen que, dadas las condiciones climáticas y ubicación de Colombia, así como su gran capacidad hidráulica, se tiene un alto potencial para el aprovechamiento de este tipo de energías, aunque se deben crear las condiciones necesarias, sobre todo desde el punto de vista político y legal, así como los costos que pueden presentarse en zonas no interconectadas. Para los autores, aún no se ha aprovechado al máximo el potencial de las PCH en el país, ya que calculan cerca del 1% de capacidad usada, y afirman además que las centrales menores de 20 MW son rentables dados los incentivos tributarios y las características del mercado.

[10] elaboran un extenso estudio acerca de las lecciones aprendidas del impacto de los proyectos de generación de energía hidráulica, para una zona específica como es el oriente del departamento de Antioquia; dicha investigación concluye que debe empezar a darse una transición de las grandes centrales hidroeléctricas hacia las PCH, dado entre otras cosas, los enormes costos de las primeras y la dificultad para acceder en proyectos de este tipo en muchas zonas del país. De igual manera, hacen un resumen de los aspectos a tener en cuenta en el momento de realizar inversiones sociales como estas, rescatando 7 elementos fundamentales: la confianza es la base del éxito, construir sobre lo construido, la unión hace la fuerza, preparar para el futuro, sin lo esencial no hay desarrollo, conocer para conservar y estar atento a las alertas. Dentro de las conclusiones a las que llegan los autores, se tiene que se deben ampliar los estudios acerca de proyectos de diseño y construcción de PCH, dado que aún existen impactos que no están dimensionados.

En la misma línea [11] adelantó un estudio sobre los impactos de una PCH en el municipio de Cocorná, Antioquia, llegando a la conclusión que se tiene un alto impacto en el aspecto social con la construcción de hidroeléctricas, por lo cual proponen profundizar sobre los mismos de forma que se pueda garantizar aspectos como la salud, el crecimiento económico, y en general el bienestar de las comunidades que integran el entorno de este tipo de proyectos. De igual forma, concluyen que las comunidades con fundamentales para este tipo de propuestas, de allí la importancia de concertar con las mismas, de forma que se puedan llegar a acuerdos comunes. Para terminar, aducen que generalmente en proyectos de PCH se da más importancia a factores de tipo económico y ambiental que al social, motivo por el cual en muchas ocasiones se entra en discrepancia con las comunidades.

[12] presentan un estudio acerca del potencial de las PCH en la región central de Colombia, llegando a conclusiones interesantes, como el hecho que el país tiene una gran capacidad de generación de energía sin aprovechar y, paradójicamente, tiene muchas zonas que no están conectadas a ningún tipo de sistema

que les permita acceder a este recurso. Afirman también que este tipo de proyectos tienen ventajas, como el hecho de sus relativos bajos costos, rápida instalación y la posibilidad de ser acogidos por beneficios económicos en el marco de la ley colombiana.

Sumado a lo anterior, se tiene que las PCH constituyen una de las tecnologías de fuentes no convencionales más desarrolladas a nivel internacional, lo cual contrasta con el poco avance del país en este sentido [12]. Además, el autor propone llevar a cabo un estudio detallado de las capacidades de generación de energía a partir de PCH en cada una de las regiones del país, de tal manera que se puedan implementar políticas gubernamentales efectivas para su implementación y aprovechamiento.

3.1 Consideraciones para los proyectos de PCH

Conforme lo expusieron [1] según la normativa colombiana, estos son los principales requisitos para un proyecto de PCH:

1. Documento con la descripción general del proyecto, estudio del recurso hídrico, la topografía, la localización y características.
2. Autorización de la autoridad ambiental.
3. Diagnóstico Ambiental de Alternativas.
4. Estudio de prefactibilidad y el diagnóstico de ser necesario, el cual debe ser enviado a la autoridad ambiental.
5. Estudio de potencial hídrico energético de la cuenca a emplear.
6. Concepto de presencia de comunidades étnicas o territorios colectivos.
7. Investigación de licencias mineras en el área donde se llevará a cabo el proyecto.
8. Estudio de factibilidad y de impacto ambiental.
9. Compra de los predios y obtención del título de propiedad.
10. Estudio de conexión eléctrica.
11. Diseños definitivos del proyecto.
12. Proceso de declaratoria de utilidad pública del proyecto y cierre financiero.
13. Se informa a la autoridad ambiental el inicio de la construcción y se adquieren los seguros de construcción, transporte, montaje y operación de la central.
14. Se inicia la construcción y se elabora el contrato de conexión eléctrica y de venta energética.

En cuanto a los alcances técnicos y ambientales [1], estos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Alcances técnicos y ambientales.

Etapas	Alcance técnico	Alcance ambiental
Reconocimiento	Identificación de posibilidades energéticas de una cuenca y conformación de un catálogo de proyectos base para la selección de las mejores alternativas.	Identificación general de conflictos y restricciones ambientales.
Prefactibilidad	Determinación del esquema de uso y explotación integral más adecuado de los recursos energéticos de una cuenca se definen alternativas de los proyectos.	Análisis comparativo de las implicaciones ambientales de los proyectos y sus alternativas factibles desde el punto de vista ambiental.
Factibilidad	Obtención de los elementos para definir si un proyecto es técnico, económica y financieramente viable para el país.	Evaluación detallada de los impactos ambientales que ocasionaría el proyecto. Formulación a nivel de pre- diseño del plan de manejo ambiental y cuantificación de los indicadores necesarios para hacer comparable el proyecto con otros que se encuentren en la misma etapa a nivel ambiental.
Diseño	Análisis final de las características detalladas de ingeniería y de las especificaciones de los diferentes componentes	Evaluación y recomendación de los posibles cambios técnicos derivados de los análisis ambientales a fin de obtener el óptimo técnico ambiental del proyecto.

Construcción	Ejecución del proyecto y realización de pruebas operativas.	Ejecución del plan de manejo ambiental, el cual incluye la aplicación del sistema de calidad ambiental.
Operación	Funcionamiento comercial de la planta.	Ejecución del Plan de Manejo Ambiental de operación.

En la construcción de grandes como de pequeñas centrales hidroeléctricas se producen impactos ambientales de diversa índole que están relacionados con la productividad del suelo, la escasez del agua, afectaciones en el ciclo hidrológico y en el caudal ecológico, degradación en la calidad del agua, conversión del hábitat, disminución de aguas superficiales, descenso de niveles freático, entre otros [6].

En concordancia con lo anterior, [13] afirman que parte de los impactos se evidencian en los tramos secos que se ubican en el azud hasta el punto donde retornan las aguas turbinadas, lo que ocasiona afectación en el equilibrio ambiental en épocas de mínimo caudal, ya que el agua que es requerida para la operación de la central es superior al que ofrece la fuente, a la vez que se evidencia reducción de la fauna acuática. En este sentido, [14] propone una metodología a emplear para definir el impacto ambiental de los proyectos, donde se contemplen los siguientes elementos:

- *Naturaleza*: aspectos positivos o negativos del proyecto
- *Intensidad*: grado de afectación por la actividad, contemplando la velocidad de esta (Media, baja o alta)
- *Extensión*: área de influencia en relación con el entorno (% del área respecto del entorno)
- *Momento*: persistencia del efecto en el tiempo (Corto, mediano o largo plazo)
- *Persistencia*: plazo temporal de manifestación del impacto (Fugaz, temporal o permanente)
- *Reversibilidad*: capacidad de revertir efectos negativos (Corto, mediano o largo plazo, o irreversible)
- *Sinergias*: posibilidad de que el efecto combinado de dos o más impactos sea mayor a la suma de ellos
- *Acumulación*: carácter aditivo en el tiempo de efectos ocasionados (Simple o acumulativo)
- *Efecto*: posibilidad de ocasionar directa o indirectamente un efecto secundario
- *Periodicidad*: frecuencia con la que se presenta el impacto (Irregular, periódico o continuo)
- *Recuperabilidad*: posibilidad de retornar la afectación a condiciones normales anteriores a la intervención humana implementando medidas de mitigación, prevención, compensación o potenciación.

Igualmente, [15] proponen dos posibles rutas metodológicas, basadas en una revisión extensa de literatura, mostradas en las Figuras 1 y 2.



Figura 1. Criterios básicos implementación PCH, Propuesta 1

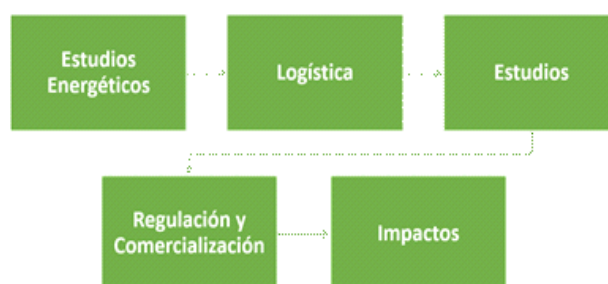


Figura 2. Criterios básicos implementación PCH, Propuesta 2

Referente a los impactos ambientales [5], en la Tabla 2 se hace un resumen de estos.

Tabla 2. Impactos ambientales generados por construcción de PCH

Impacto	Aspecto	Descripción
Procesos geofísicos	Erosión	Efectos que ocurren en la corteza de la tierra ocasionando pérdida física del suelo. Se manifiesta cuando el suelo queda expuesto al movimiento del agua o del viento, o cuando hay fuerzas de gravedad en montañas.
	Sedimentación	Efecto de partículas que se encuentran en el agua y se van hacia el fondo. Se atribuye a la velocidad con la que estas se mueven y a su tamaño.
	Estabilidad de laderas	Efecto de alud por deslizamiento o colapso en condiciones normales.
Suelos	Uso del suelo	Actividad que se realiza sobre un suelo tomando como referencia las propiedades de él. Puede ser para agricultura, silvopastoril, conservación, protección, etc.
Ecosistemas terrestres	Flora	Especies e individuos vegetales, silvestres o cualitativos que se nutren de los órganos que estén en el suelo, el aire, el agua, etc.
	Fauna	Animales de diferentes taxones que pertenecen a un ecosistema y que pasan la mayor parte de su vida en medio terrestre.
	Corredores biológicos	Espacio geográfico delimitado para ecosistemas naturales terrestres, modificados o remanentes que aseguran la diversidad biológica y procesos ecológicos evolutivos a través de intercambio genético y migración de especies.
Ecosistemas acuáticos	Perifiton	Bacterias, hongos, algas y protozoos que viven en los cuerpos de agua, quienes pueden estar afectados por la calidad o cambios que se produzcan en el agua, afectando la cadena trófica.
	Fauna	Animales vertebrados o invertebrados de diferentes taxones que pertenecen a un ecosistema y que pasan la mayor parte de su vida en el medio acuático.
	Hábitat acuático	Nicho ecológico de cada una de las especies presentes en ecosistemas acuáticos, incluyendo las variables abióticas y bióticas.
	Corredor biológico	Espacio geográfico delimitado para ecosistemas naturales acuáticos, modificados o remanentes que aseguran la diversidad biológica y procesos ecológicos evolutivos a través de intercambio genético y migración de especies.

Ahora bien, en cuanto a los impactos sociales por considerar en la construcción de PCH [5], aunque los proyectos representen una solución para ciertas necesidades carentes en las sociedades, es importante evaluar la forma como se impacta a la población, como se puede evidenciar en la Tabla 3.

Tabla 3. Impactos sociales

Aspecto	Descripción
Conflicto por el proyecto	Impedimentos para que la comunidad desarrolle actividades donde se instalará la PCH. Emplear estrategias de comunicación por parte de un profesional de área social y experiencia en gestión de proyectos y el gerente.
Generación de expectativas	Espera de bonificaciones económicas por parte del proyecto para la comunidad que llevan a cabo actividades económicas provenientes de la agricultura.
Inversión en la comunidad	Construir vías, escuelas, espacios deportivos, desarrollar otras actividades económicas por parte del proyecto que beneficien a la comunidad.
Desplazamiento de la población	En la construcción de PCH no es una afectación por su tamaño, pero en grandes centrales si debe contemplarse este aspecto.

4. MÉTODO

Por tipo, el presente estudio es descriptivo, dado que se pretende describir los aspectos fundamentales frente al tema de las PCH en Colombia, desde el punto de vista histórico y de proyectos llevados a cabo, así como las metodologías para el desarrollo de este tipo de proyectos. Así las cosas, se lleva a cabo una investigación documental y con enfoque cualitativo para esta primera fase del proyecto de investigación. Dentro de la primera fase de esta investigación se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- Búsqueda bibliográfica
- Planteamiento del problema
- Análisis bibliográfico a partir de una revisión sistemática de literatura
- Selección de categorías de análisis y elaboración de marco teórico

Para la revisión documental, se accedió a bases de datos académicas, en donde se realizó una búsqueda de proyectos e investigaciones relativas al diseño y construcción, así como los impactos de las PCH, usando para tal objetivo una matriz de revisión sistemática de literatura, como la mostrada en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz revisión sistemática de literatura

Pregunta	Criterios de inclusión	Bases de datos	Términos de búsqueda	Resultado inicial	Evaluación Resultados
¿Qué proyectos de diseño y construcción se han llevado a cabo en el país, y cuáles han sido sus impactos?	Año de publicación, tipo de estudio, fuente, temática	Scholar Google, Dialnet, Scielo, Science Direct, SSRN, DOAJ.	PCH en Colombia, Diseño y construcción de PCH, Proyectos de PCH, Impactos PCH	58 textos	19 textos seleccionados

En la segunda fase se llevará a cabo el diseño de una turbina con las medidas y especificaciones técnicas requeridas para ser empleada en una PCH para una región específica del departamento de Antioquia.

Ahora bien, dentro de la parte de diseño estructural de la posible turbina a utilizar, de la cual se tiene un diseño previo (está pendiente del proceso de validación por especialistas y de la fase de simulación, lo cual hace parte de la segunda fase del proyecto), se tuvieron en cuenta los requerimientos técnicos relativos a temas como: caudal, potencia y altura, tubería, y velocidad de giro.

En cuanto a las características funcionales del diseño, enfocado en la posibilidad de construcción y puesta en marcha de la turbina en la PCH, en la zona específica Vereda Piedras Blancas, Guarne, Antioquia, se toman en cuenta los siguientes criterios de ingeniería del diseño [16-18]:

- Posibilidad para el transporte de piezas o prototipo armado, dado que se pretende implementar en una región rural.
- Tender a la menor cantidad de herramientas necesarias para su armado.
- Uso de piezas disponibles en el mercado, o susceptibles de ser fabricadas, además de estar constituidas por materiales durables.
- Tender a un bajo costo de mantenimiento y operación.

Dentro del análisis que se está haciendo para lo posible implementación del proyecto de PCH en la zona rural antes mencionada, se llevaron a cabo una serie de encuestas, dirigidas a un total de 20 hogares, con el fin de determinar el posible interés en dicho proyecto, así como las expectativas de los posibles impactos en la comunidad implicada.

La encuesta estuvo constituida por 5 preguntas en escala Likert (En una escala del 1 al 5, donde 5 es Muy interesante y 1 es Nada interesante), en donde se pretendió indagar de forma específica lo siguiente:

- Interés en el suministro de energía limpia a partir de una PCH.
- Aspectos relativos al diseño de la turbina propuesta.
- Posibles lugares donde podría ser instalada, y su impacto en el entorno.
- Tipo de información que podría requerir acerca del proyecto.
- Relación costo - beneficio del proyecto.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El análisis de los resultados obtenidos para cada una de las preguntas realizadas a la comunidad de la vereda Piedras Blancas, se acompañó de su respectivo análisis de Pareto, como herramienta para la toma de decisiones a partir de la información que se organiza en forma descendente, de menor a mayor relevancia, con el fin de determinar cómo el 80% de las consecuencias provienen del 20% de las causas, de allí que sea vital prestar importancia a estas últimas [19].

En este sentido, para la pregunta 1, relativa al interés por la implementación de un posible proyecto de PCH en la zona, 50% calificó al proyecto en 5 como muy interesante, el 35% seleccionó un valor de 4 y un 15% seleccionó un valor de 3 (Figura 3).



Figura 3. Análisis de Pareto pregunta 1

Frente a la pregunta 2, relativa a aspectos específicos del diseño de la turbina propuesta, el 50% de la población encuestada se ven atraídos al proyecto por ser amigable con el medio ambiente y el 35% por la disminución de costos, siendo estos los porcentajes más relevantes; solo el 5% mencionan la innovación como un aspecto relevante a tener en cuenta (Figura 4).



Figura 4. Análisis de Pareto pregunta 2

En cuanto a la pregunta 3, los resultados arrojaron lo siguiente: el 60% de los encuestados prefieren la implementación del proyecto en sus hogares seguido del 25% que lo prefieren para una vereda/comuna y el 15% en otros lugares. Lo anterior lo contrastan con la posibilidad de impactos del proyecto, tanto positivos como lo es el tema económico, pago de regalías, alquiler o venta de terreno, como los negativos que pueden ser de tipo ambiental y social (Figura 5).



Figura 5. Análisis de Pareto pregunta 3

Los resultados de la pregunta 4 se muestran en la Figura 6; en esta se indagaba acerca de información requerida del proyecto, tanto de tipo técnica como de posibles impactos. Un 35% y un 30%, respectivamente, responde que requieren este tipo de información, el 35% no muestran interés por información de este tipo, o solo se interesan por temas de posibles beneficios a futuro.



Figura 6. Análisis de Pareto pregunta 4

Para finalizar, con respecto a la pregunta acerca de la posible relación costo - beneficio, La mayoría de las personas encuestadas (45%) no se atraen por el proyecto ya que lo consideran complicado, el 40% lo consideran costoso y el resto no lo ven necesario o consideran otros aspectos (Figura 7).



Figura 7. Análisis de Pareto pregunta 5

6. CONCLUSIONES

Colombia tiene un gran potencial por aprovechar en temas energéticos; particularmente, su riqueza hídrica le permitirá generar proyectos a diferentes escalas para el diseño y construcción de centrales hidroeléctricas que den abastecimiento no solo al país, sino a otros países vecinos. En este sentido, el departamento de Antioquia se ha caracterizado por ser pionero en este tipo de proyectos.

Si bien es cierto que en cuanto a grandes centrales hidroeléctricas, el país, y sobre todo el departamento de Antioquia, presentan un avance importante con proyectos de gran envergadura y de inversiones muy altas, se tiene que aún existen muchas zonas no interconectadas con el sistema de generación de energía, en las cuales este tipo de proyectos no resultan viables, dadas las bajas densidades poblacionales, los relativos bajos ingresos de las comunidades y la dificultad de acceso por condiciones climáticas, del terreno y logísticas. Es en estas zonas en donde las PCH pueden ser una alternativa válida, debido a incurrir en costos mucha más bajos que las grandes centrales, ser más fáciles de instalar, operar y mantener en un adecuado funcionamiento.

En Colombia no se han promovido de igual forma los proyectos de PCH que los de las grandes centrales, y de hecho se tiene un vacío de conocimiento frente a aspectos como la cuantificación de los verdaderos impactos ambientales y sociales de su implementación. En este sentido, se requiere de un mayor trabajo colaborativo entre la academia, las empresas, el estado y la comunidad para generar este tipo de conocimiento, de tal forma que los futuros proyectos, ya sean de PCH o de otro tipo de formas de generar energía para las comunidades tengan un menor impacto negativo en las mismas.

A partir de la revisión bibliográfica se pudo evidenciar como la mayoría de los autores coinciden en la importancia de contar con la participación de las comunidades en donde se pretende desarrollar un proyecto de PCH, dado que son estas últimas las que terminan siendo las más impactadas, ya sea de forma negativa o positiva, en aspectos no solo ambientales y económicos, sino también de tipo social.

La encuesta realizada, si bien su tamaño es relativamente pequeño y solo puede ser tomada como referente para el sector particular en donde se aplicó, muestra como la desconfianza de las comunidades frente a proyectos como los que se plantean en esta investigación; lo anterior puede tener muchas explicaciones, que van desde el desconocimiento de aspectos técnicos propios de los proyectos, hasta los paradigmas que se han formado en estas personas acerca de las inversiones que hace el estado o los particulares en alguna zona, los cuales, sea han alimentado por la desconfianza en las instituciones, la presencia de actores armados, el abandono del estado y la falta de oportunidades e infraestructura que si tienen las zonas urbanas.

REFERENCIAS

- [1] Patarroyo A. et al. (2020). Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's). Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [2] Gómez T. (2020). Actualización del inventario de PCH's en Colombia en una herramienta computacional para visualización web. Trabajo de grado. Universidad de la Salle.
- [3] Morales C. y Saavedra F. (2017). Diseño de una pequeña central hidroeléctrica para el municipio de Pisba, Boyacá. Trabajo de grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

- [4] Pacheco N. y Torres J. (2021). Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga. *Revista Mutis* 11(2), 84-95.
- [5] Osorio I. (2017). Impactos ambientales, sociales y económicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Antioquia. Tesis de maestría. Universidad EAFIT.
- [6] Osorio A. y Cifuentes L. (2020). Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en el Oriente del departamento de Caldas. Impactos ambientales y resistencias sociales en el posconflicto. *Revista Jurídicas*, 17(2), 180-198.
- [7] Morales S. et al. (2014). Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación. *DYNA* 81(184), 178-185.
- [8] Romero J. y Moreno A. (2018). Diseño y construcción de la pequeña central hidroeléctrica (PCH) Liborina I-EMGEA. Trabajo de grado. Universidad Piloto de Colombia.
- [9] Robles C. y Rodríguez O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Revista Espacios* 39 (34), 10-25.
- [10] Jaramillo S. y Suarez L. (2019). Lecciones aprendidas de los impactos ambientales en los proyectos de generación de energía hidráulica en el Oriente antioqueño: Una transición de las grandes centrales a las pequeñas centrales de generación de energía hidroeléctrica. Tesis de Maestría. Universidad EAFIT.
- [11] Duque H. (2021). Análisis de los impactos sociales de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en las comunidades del oriente antioqueño: Caso PCH el Popal, municipio de Cocorná. Tesis de Maestría. Universidad de Medellín.
- [12] Villarraga W. (2020). Potencial energético de pequeñas centrales hidroeléctricas en la región central (Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Meta y Bogotá). Trabajo de grado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [13] Hernández T. y Hernández S. (2017). Impactos ambientales de las pequeñas centrales hidroeléctricas a filo de agua en montañas andinas. Caso El Edén, Pensilvania, Caldas. Trabajo de grado. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- [14] Dellavedova M. (2010). Guía metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental. Universidad Nacional de La Plata.
- [15] Escobar A. et al. (2018). Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH): Una revisión. *Visión Electrónica*, algo más que un estado sólido 1(1), 111-126.
- [16] Cross N. (2002). Métodos de diseño: Estrategias para el diseño de productos. Limusa Wiley.
- [17] Pahl G. et al. (2007). *Conceptual design for engineers*. Springer.
- [18] Vilchis L. (1998). *Metodología del Diseño*. Fundamentos Teóricos. Editorial Claves Latinoamericanas.
- [19] Gallach F. et al. (2020). Diagrama de Pareto y Lean Manufacturing. Editorial Área de Innovación y Desarrollo.

Análisis y atención a las contingencias en el sistema eléctrico mexicano mediante la información de sistemas de información

Francisco Javier Lira Mendoza¹

Daniel Jiménez Alcantar²

Moisés Ramón Villa Fajardo³

^{1,2} *Comisión Federal de Electricidad*

³ *Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo*

México

El departamento de Geomática de la Comisión Federal de Electricidad México CFE es un área dedicada a brindar soluciones, servicios y productos de desarrollo de sistemas geoespaciales móviles, sistemas de información geográfica y percepción remota, utilizando diferentes métodos para el análisis, manejo, desarrollo, captura, almacenamiento, clasificación e integración de información geográfica y tecnológica. Esto se desarrolla desde el Sistema Nacional de Emergencia SISNAE, el cual utiliza sistemas de análisis geográfico como los ARCGIS, Geo Server y QGIS de código abierto, que permiten realizar visualización, análisis, geo procesos, publicación, topologías, estadísticas y clasificaciones de capas de información. En este capítulo se muestra cómo se trabaja desde el SISNAE con un sistema completo, que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica para atender las emergencias producidas por fenómenos naturales, así como para gestionar las afectaciones en la operación diaria de la infraestructura de la red eléctrica. Asimismo, se muestra el proceso de monitoreo de fuentes externas de información, como National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA y el Departamento de Hidrometeorología de CFE, para realizar seguimiento y monitoreo de los huracanes y tormentas, así como U.S. Geological Survey USGS, Sismológico Nacional y Departamento de Sismotectónica para el caso de los sismos. Todo ello teniendo como objetivo principal mantener informados de estos eventos a los usuarios de los sistemas, para puedan realizar estrategias y maniobras de forma oportuna para el mantenimiento de la red eléctrica.

¹ Ingeniero en Sistemas, Magíster en alta Dirección y Doctor en Educación.

Contacto: francisco.liram@cfe.mx

² Ingeniero en Sistemas y Magíster en Ciencias de la computación.

Contacto: daniel.jimenezal@cfe.mx

³ Ingeniero en Sistemas Computacionales, Magíster en Tecnologías de la Información y Doctor en Educación.

Contacto: mvilla@ucemich.edu.mx

1. INTRODUCCIÓN

Entre las diversas áreas con las que cuenta en su estructura la CFE, se encuentra el Departamento de Geomática, la cual es un área dedicada a brindar soluciones, servicios y productos de Desarrollo de Sistemas Geoespaciales móviles, Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota, utilizamos diferentes métodos para el análisis, manejo, desarrollo, captura, almacenamiento, clasificación e integración de información geográfica y tecnológica.

Se utilizan los mejores sistemas de análisis geográfico, tales como los Sistemas ARCGIS de ESRI [2], Geo Server [3] de código abierto y QGIS [4] de código abierto, que nos permiten realizar visualización, análisis, geo procesos, publicación, topologías, estadísticos y clasificaciones de capas de información. Es considerado un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

2. MÉTODO

Esta investigación se llevó a cabo utilizando una metodología combinada que por un lado se alinea con el Manual de procedimientos técnicos para la atención a desastres, casos fortuitos o de fuerza mayor en las redes generales de distribución, y aplica en los apartados de las etapas I, II, III y IV, en la etapa I: *Procedimiento para actividades preventivas ante la presencia de desastres*, en la Etapa II: *Acciones a ejecutar derivadas de la ocurrencia de un desastre, caso fortuito o de fuerza mayor*, en la etapa III: *Procedimiento de actividades a ejecutar para el restablecimiento del servicio de energía eléctrica de manera integral*, y en la 4ta etapa IV: *Acciones para ejecutar después de haber restablecido el servicio de energía eléctrica* Por otro lado, para el desarrollo de la plataforma SISNAE GEO se aplicaron metodologías de desarrollo ágil como SCRUM y KANBAN.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Contingencias

Una contingencia se deriva cuando algo puede suceder o no, sin embargo, nos da la posibilidad de estar preparados, en este caso hablaremos de fenómenos naturales que afectan a nuestro país, como son sismos, como el que vivimos en 2017, Tormentas y Huracanes que continuamente afectan a nuestro país, donde podemos mencionar a continuación algunos ejemplos.

Sismos

- Sismo 8.2 grados epicentro Pijijiapan
- Sismo 7.1 grados epicentro 12 km de Axochiapan, Morelos
- Sismo 6.1 grados epicentro Unión Hidalgo, Oaxaca

Tormentas

- Tormenta tropical Beatriz
- Tormenta tropical Calvin
- Tormenta Tropical Franklin, Tormenta Tropical Lidia

Huracanes

- Huracán Franklin
- Huracán Katia
- Huracán Max

Las emergencias que se derivan en el desarrollo de un evento que afecta la integridad de la red eléctrica de CFE. Esto nos lleva a tener un plan de atención de desastres ante los cortes de la distribución del servicio eléctrico cuando se afecta la infraestructura. Para una contingencia que derivará en emergencia, se cuenta con actividades principales que se realizan en las 4 etapas del *Manual de procedimientos técnicos para la*

atención a desastres, casos fortuitos y de fuerza mayor en las redes generales de distribución de CFE Distribución [5] (Tabla 1). Las acciones previas tienen que ver con los mantenimientos preventivos y predictivos, así como la organización del personal.

Tabla 1. Etapas del manual de procedimientos técnicos de atención a desastres de CFE distribución

Etapa	Descripción
1. Acciones previas (antes)	Identificar áreas de riesgo con posible afectación a la infraestructura eléctrica, disponibilidad de personal y equipos, abastecimiento de materiales en almacenes estratégicos y actualización de información y datos básicos en sistemas institucionales. Para conformar el plan de contingencias.
2. Evaluación (durante)	Se establece el Centro de Operación Estratégico COE, definiendo los posibles escenarios de daños, realizando la evaluación del plan de contingencia, para determinar la cantidad de recursos necesarios, así como la participación en las reuniones que se convoque en los Comités de Protección Civil nacional, estatal y municipal. Informando a la Dirección Corporativa de Operaciones los recursos definidos para la atención de la contingencia.
3. Restablecimiento (después)	Después del impacto del ciclón tropical o la ocurrencia del sismo se realiza la evaluación de daños en infraestructura eléctrica, se restablece el suministro eléctrico en la infraestructura sin daño, se instalan plantas de emergencia en servicios prioritarios y se informa a la Dirección Corporativa de Operaciones el avance de restablecimiento.
4. Reconstrucción (después)	Se realiza la reconstrucción de la infraestructura eléctrica para regresar la confiabilidad a las redes generales de distribución, el cierre administrativo del evento, así como la integración de la información necesaria para el reclamo de daños ante la aseguradora.

3.1.1 Acciones previas

Como acciones previas se trabaja en identificar la infraestructura vulnerable a través de los programas de inspección y mantenimiento, también se identifican las áreas de riesgo, zonas de difícil acceso, áreas con alto riesgo sísmico (Figura 1).

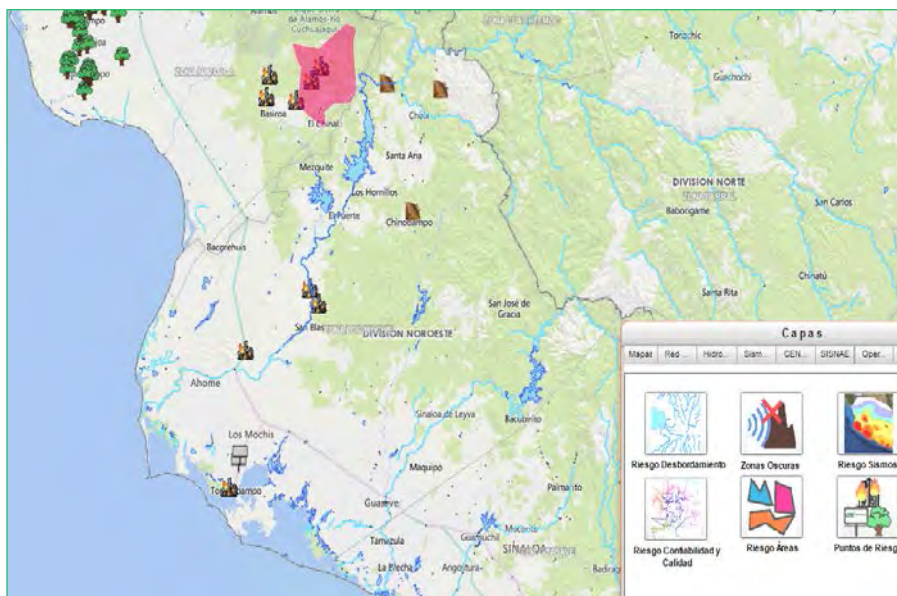


Figura 1. Conjunto de capas de Riesgos para las RGDs

Ante el impacto de un evento de causa mayor, tales como tormentas tropicales, huracanes, sismos, frentes fríos. La Comisión Federal de Electricidad está preparada para activar protocolos de contingencia. La misión es restablecer en el menor tiempo posible, el suministro de energía que resulte afectado por el evento. El grupo al cual pertenecemos cuenta con planes específicos para atender emergencias antes, durante y después del impacto de un fenómeno meteorológica. Cada año se realiza la Reunión Nacional de Huracanes, con el objetivo de revisar los mecanismos, para atender de manera oportuna cualquier afectación a la infraestructura eléctrica que se genere cuando pasa un evento de causa mayor.

En este trabajo se comparte la visión de cada uno de los integrantes del diferente Estados de la república, los cuales integran al Comité de Operación Estratégica. Se presentan de los planes de prevención y ejecución

ante una contingencia. Se muestra y comparten las maniobras en se ejecutaron en eventos pasados en campo y fueron exitosas.

La Comisión Federal de Electricidad se prepara de manera constante, capacitando a su personal en procesos operativos y de seguridad. Así como la actualización de la información en los sistemas institucionales. Ante un evento de contingencia, el personal necesita saber que le toca hacer y cómo hacerlo. Por ello, cada año se realiza previo a la temporada de huracanes. Simulacros que permitan conocer las condiciones de un evento de contingencia. En el caso de los ingenieros que integran el Centros de Operación Estratégica, se capacita en el Sistema Nacional de Emergencias Geográfico SISNAE GEO.

El objetivo del SISNAE GEO es ser una herramienta geográfica de apoyo para la alta dirección en la toma de decisiones en los casos de una contingencia. En el SISNAE GEO se puede visualizar las trayectorias de los fenómenos meteorológico, el área de afectación, la infraestructura eléctrica, los estados afectados, entre otros puntos de interés para una emergencia. Los vehículos son esencial al momento del restablecimiento, por eso es necesario saber ¿Cuántos vehículos se tienen? ¿De qué tipo son? ¿Cuáles vehículos necesitan mantenimiento? Y cuales están listos para atender en caso de una emergencia.

Con el software ARCGIS es bastante accesible la gestión geográfica de todos estos elementos, que son tan importantes para nosotros. Se puede dar seguimiento en la actualización de las condiciones en este caso de los vehículos. Uno de los elementos que manipulamos con ArcMap de ESRI y son importantes al momento de una contingencia, son los almacenes de materiales. Estos están colocados estratégicamente según las necesidades de abastecimiento cuando hay afectaciones de la infraestructura. Permitiendo tener todos los recursos necesarios para el restablecimiento de la energía.

ArcMap representa la información geográfica como una colección de capas y otros elementos en un mapa, y se ocupa para: Trabajar con mapas, Imprimir mapas, Compilar y editar datasets SIG, Usar el geoprocresamiento para automatizar el trabajo y realizar análisis, Organizar y administrar geodatabases y documentos de ArcGIS, Publicar documentos de mapa como servicios de mapas, Compartir mapas, capas, modelos de geoprocresamiento y geodatabases con otros usuarios, Documentar la información geográfica, Personalizar la experiencia del usuario.

Los almacenes son preparados previos a la temporada de huracanes (Figura 2), con objetivo de cumplir con los inventarios de materiales de alta rotación, como son: postes, transformadores, torres, líneas, entre otros. El poderío técnico y humano de la Comisión Federal de Electricidad, se encuentra listo para los grandes retos que naturaleza nos exige. Nuestra misión es mantener el nivel de confiabilidad y calidad del servicio, en hogares, hospitales y sistemas de aguas. Los cuales son elementos indispensables para la lucha contra el Covid-19. Durante la temporada de huracanes se monitorea constantemente las condiciones atmosféricas, a través de su servicio meteorológico interno y el cual también se coordina con el Sistema Nacional de Protección Civil.



Figura 2. Eventos y seguimiento de huracanes

Al detectar la posible amenaza de un fenómeno meteorológico la CFE, se pone en marcha los protocolos de despliegues del personal. Para situarlos en zonas estratégicas previo a la llegada de una tormenta tropical. También se instalan centros de operación estratégicos en puntos claves del país. Para tomar decisiones oportunas y coordinar los procesos operativos en campo, sobre todo cuando en monitoreo se encuentra una posible afectación.

3.1.2 Etapa de evaluación

Esto ocurre durante el evento, para poder explicar esta etapa vamos a estudiar un poco el caso del Huracán Odile. En un principio la trayectoria pronosticaba que solo tocaría parte de los cabos de Baja California, el impacto sería con una velocidad entre 154 - 177 Km/h. Es decir; el Huracán tendría un impacto como Categoría 2, Escala Saffir Simpson [6]. El pronóstico a 24 hrs. antes del impacto, nos permite el activar los protocolos de una emergencia para ubicar estratégicamente al personal y los vehículos.

Aproximadamente a las 04:45 UTC del 15 de septiembre, el Odile entra en territorio nacional causando su primer impacto a una velocidad 205 Km/h en tierra cerca de Cabo San Lucas en la península de Baja California, este huracán fue clasificado con categoría 3. Odile se debilitó gradualmente a categoría uno, a las 21:00 UTC del 15 de septiembre. Se debilitó a tormenta tropical a las 03:00 UTC del día siguiente y, después de 39 horas, el Odile se debilitó a depresión tropical, con un desplazamiento al noreste del país; finalmente, el 17 de septiembre a las 21:00 UTC Odile, se clasifica en un sistema de remanentes.

Cabe mencionar que, durante el evento desde que impacta con territorio nacional, ya se cuentan con afectaciones por las velocidades de los vientos, la presión atmosférica y la cantidad de agua que lleva el huracán (Figura 3). Durante el evento, los equipos especialistas en la evaluación, identifican la infraestructura que puede ser restablecida a corto, mediano y largo plazo. Esta información es reportada en los sistemas geográficos institucionales, para su evaluación en el Centro de Operación Estratégica.

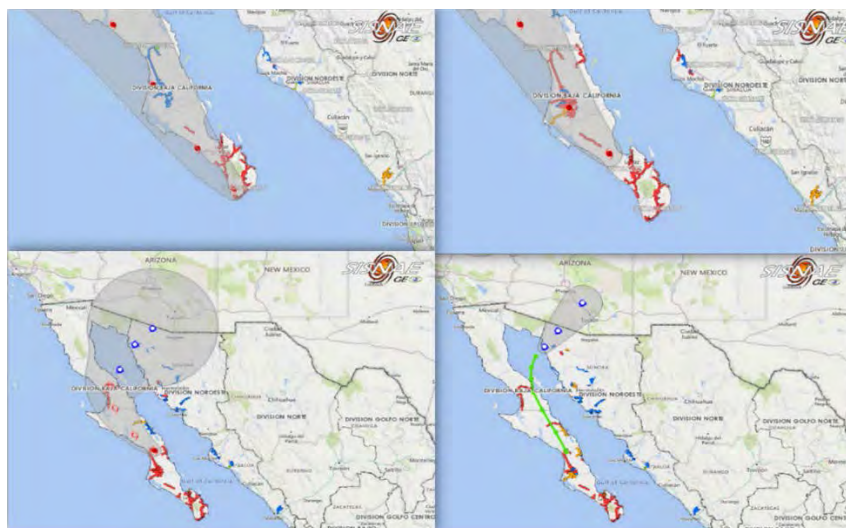


Figura 3. Seguimiento de afectaciones a las RGDs por huracán

3.1.3 Etapa de restablecimiento

En esta etapa se realizan las actividades de evaluación de los daños en la infraestructura eléctrica y los usuarios importantes, los cuales son, hospitales, bombas de agua, edificios gubernamentales, albergues, edificios militares, centros comerciales, industrias, tortillerías, entre otros, se reestablece el suministro en la infraestructura sin daños, se instalan las plantas de emergencia a servicios prioritarios y se registra la información en los sistemas institucionales.

En esta etapa en el centro de operación estratégica, también se hace el seguimiento de restablecimiento, donde la coordinación de personal se realiza a través de los sistemas geográficos, se detentan las áreas con difícil acceso y se realizan las notas informativas para el registro de los avances de restablecimiento.

En estas actividades, se realizan maniobras y de acuerdo a la afectación se estudia qué infraestructura puede ser restablecida por condiciones normales, que infraestructura puede ser restablecida por medio de maniobras, las cuales pueden ser de alto riesgo y que infraestructura se debe de reconstruir, todo esto para garantizar un trabajo ágil y oportuno de establecimiento. La CFE cuenta con un canal de comunicación con los usuarios donde realizan ordenes de servicio a través del 071, las cuales se ven reflejadas en los sistemas geográficos y se identifican las de prioridad alta.

3.1.4 Etapa de reconstrucción

En la etapa 4 se realiza la reconstrucción y el aseguramiento de la permanencia de la infraestructura. En los almacenes que están ubicados estratégicamente y que cuentan con postes, transformadores, cable, y demás insumos para un restablecimiento, se generan planes de traslado a las zonas con afectación y donde se encuentran plantas de emergencia, se retiran en cuanto se restablece el servicio. Los helicópteros en la etapa de reconstrucción se ubican estratégicamente cerca de las áreas de difícil acceso, apoyando en el traslado de materiales y personal (Figura 4).



Figura 6. Seguimiento y apoyo al restablecimiento con helicópteros

Por parte del comité de Operación estratégica se lleva el seguimiento del restablecimiento y de la reconstrucción de la infraestructura eléctrica, y ellos determinan cuando se realice el cierre administrativo del evento, así como la integración de la información necesaria para el reclamo de daños ante la aseguradora.

El Sistema nacional de Atención de Emergencias Geográfico tiene como objetivo brindar las herramientas y mecanismos adecuados para cumplir eficazmente con los procesos de la Gerencia de operación de Distribución [7] para atender las emergencias producidas por fenómenos naturales, así como gestionar las afectaciones en la operación diaria de la infraestructura de la red eléctrica de distribución. Uno de los procesos más importantes es la actualización continua de la infraestructura, este proceso requiere de algoritmos de procesamiento geográfico para poder representar adecuadamente cada uno de los elementos de la red eléctrica en un ambiente cartográfico (Figura 5).

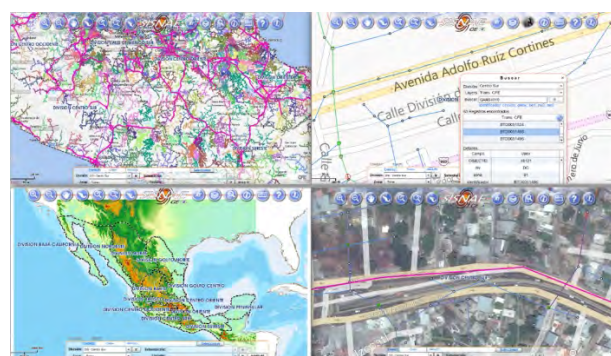


Figura 5. Visualización del Sistema Eléctrico nacional y de las RGDs en SISNAE GEO

Una vez que se tiene correctamente digitalizada la infraestructura con todo y su topología que define el flujo de energía. En SISNAE GEO se puede generar análisis eléctricos más sofisticados, como es el caso de los cambios del flujo de la red cuando un seccionador se abre o se cierra. Se pueden resolver preguntas como ¿A cuántos usuarios afecto la apertura de un equipo de seccionamiento?

El SISNAE GEO está en constante monitoreo de distintas fuentes de información de fenómenos naturales para realizar análisis geo estadístico que permitan determinar cuando un evento natural se convierte en una catástrofe para la red eléctrica. Las capas base que se manejan son para tener una referencia de ubicación de todos los elementos que se manejan en el sistema, estas capas son, por ejemplo: Imagen Satelital, Calles, Imagen Híbrida, cartografía de INEGI [8]., Altimetría, capas de Distribución y Transmisión.

Las principales capas para el manejo de información en el SISNAE GEO (Figura 6) es la infraestructura, que contempla alta tensión, media tensión y baja tensión desde los postes y registros pasando por líneas y equipos de seccionamiento, subestaciones y líneas de alta tensión. Un apoyo muy importante para los sistemas geográficos que proveen información a los sistemas son las aplicaciones móviles que recaban información directamente en sitio y se obtienen resultados de manera rápida y precisa, lo que conlleva a que los usuarios en las plataformas de escritorio puedan identificar rápidamente lo sucedido en campo.

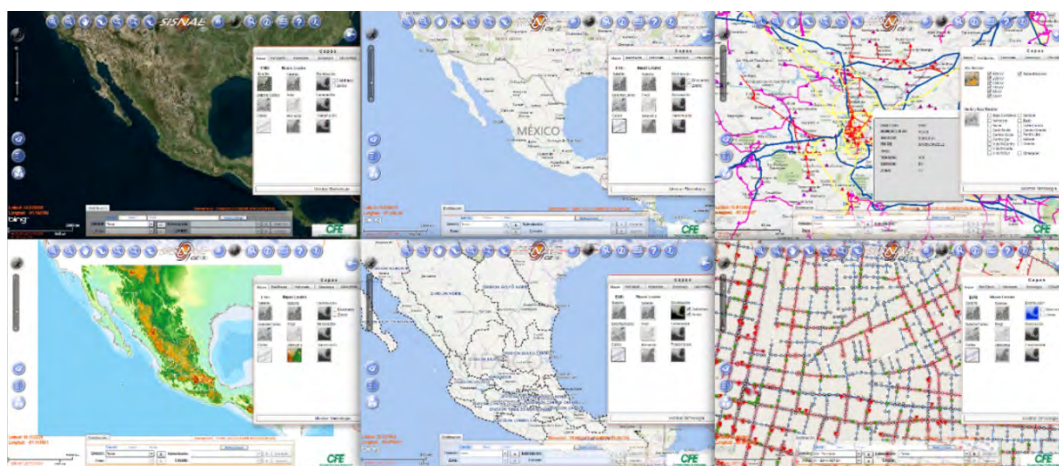


Figura 6. Capas SISNAE GEO

El monitoreo de fuentes externas de información como la NOAA y el Departamento de Hidrometeorología de CFE [9] para el caso de los Huracanes y Tormentas, así como USGS, Sismológico Nacional [10] y Departamento de Sismotectónica, para el caso de los sismos, son importantes para mantener informados de este tipo de eventos a los usuarios de estos sistemas y que puedan realizar estrategias y maniobras de forma oportuna.

Los Sistemas de Información Geográfica SIG [11] han revolucionado las infraestructuras eléctricas, convirtiéndola en redes inteligentes de información, ya que dan a conocer donde ocurren ciertos fenómenos que afectan al suministro. Constante se monitorean geográficamente los riesgos de emergencias. Los SIG, mejoran la calidad de las decisiones, ya que aumentan el poder de análisis por medio evaluaciones geoestadísticas basadas en los peligros naturales, y guían las actividades del restablecimiento, ayudan a planificar las medidas para la reconstrucción. Los SIGS permiten desarrollar sistemas automatizado por medio de cálculos espaciales.

Este tipo de sistemas sirve especialmente para dar solución a problemas o preguntas sobre organización, gestión y distribución recursos, y son utilizados en investigaciones científicas. Con la realización de estos proyectos se han detectado más oportunidades para soluciones y desarrollo de nuevas herramientas. El SISNAE GEO (Figura 7) y otras herramientas desarrolladas en la GEIC se hicieron escalables para solventar la integración con diferentes tecnologías, el desarrollo de estas tecnologías debe someterse a pruebas de funcionamiento y satisfacción del cliente, cabe mencionar que deben ser flexibles e integrar tecnologías ESRI acoplándose a las necesidades del cliente.

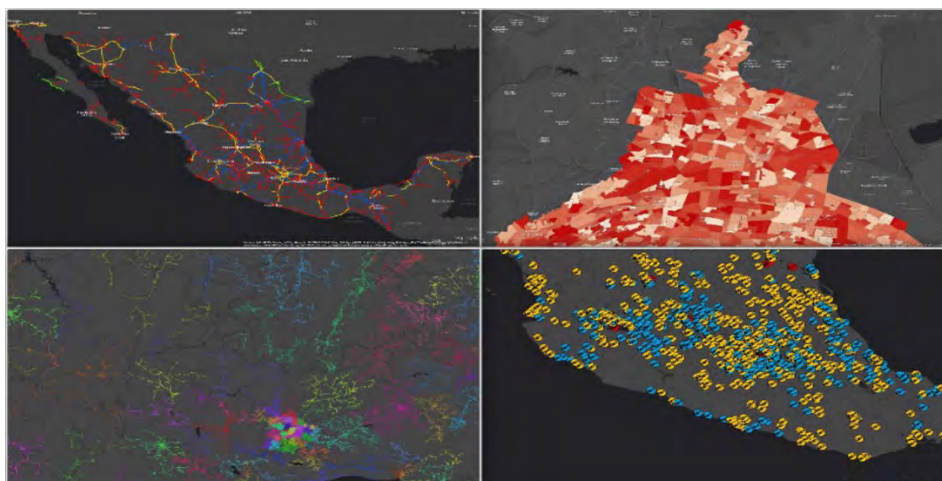


Figura 9.- Mapas SISNAE GEO

Gracias al trabajo en equipo de los trabajadores, los técnicos y los especialistas. Se demuestran a la sociedad mexicana que están listos para enfrentar los próximos retos. Con el apoyo de los sistemas Geográficos se ha logrado restablecer el 100% del suministro después de 90 hrs. de un evento.

4. CONCLUSIONES

CFE es la empresa de energía eléctrica servicios públicos más grande de América latina, y la quinta más grande del mundo; el departamento de Geomática de CFE, es un área dedicada a brindar soluciones, servicios y productos de Desarrollo de Sistemas Geoespaciales móviles, Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota, utilizamos diferentes métodos para el análisis, manejo, desarrollo, captura, almacenamiento, clasificación e integración de información geográfica y tecnológica.

El departamento de Geomática brinda soluciones, servicios y productos de Desarrollo de Sistemas Geoespaciales móviles, Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota, utilizamos diferentes métodos para el análisis, manejo, desarrollo, captura, almacenamiento, clasificación e integración de información geográfica y tecnológica.

El *manual de procedimientos técnicos para atención de desastres* de CFE Distribución, ha mostrado ser altamente eficaz y eficiente en la atención a contingencias a través de las cuatro etapas que lo integran, esto para tener un plan de atención de desastres ante los cortes de la distribución del servicio eléctrico cuando se afecta la infraestructura.

Sistemas geográficos como el SISNAE GEO, es una herramienta de apoyo en la alta dirección en la toma de decisiones, al gestionar de manera eficiente los protocolos de emergencia. En SISNAE GEO se generan los análisis eléctricos más sofisticados, como es el caso de los cambios del flujo de la red cuando un seccionador se abre o se cierra.

El restablecimiento del servicio de la red eléctrica en tiempo cortos, muestra que el trabajo del SISNAE GEO es altamente eficaz y eficiente, y está presto a atender las contingencias que pudieran presentarse.

REFERENCIAS

- [1] Comisión Federal de Electricidad. (2019-2022). Historia de la CFE: Momentos de la CFE. México.
- [2] ESRI. (2019-2022). ArcGIS Resources: Introducción a ArcGIS. España.
- [3] ESRI. (2022). About Esri: The science of where. USA.
- [4] QGIS. (2022). QGIS: Un sistema de información geográfica libre y de código abierto. GNU.
- [5] Vidal R. y Torres M. (2018). Manual de procedimientos técnicos para la atención a desastres, casos fortuitos y de fuerza mayor en las redes generales de distribución. CFE.
- [6] Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2022). Ciclones tropicales: Escala Saffir-Simpson. México.
- [7] Nevaes G. y Domínguez H. (2021). Marco normativo. en manual de organización general de CFE de distribución CFE.

- [8] INEGI. (2022). Institución con historia: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- [9] Comisión Federal de Electricidad. (2022). Boletines: Alertas meteorológicas, Vientos Fuertes. México.
- [10] Servicio Sismológico Nacional. (2022). Objetivos. México.
- [11] CONACYT y CentroGeo. (2018). Centro de Investigación en Ciencias de información geoespacial, análisis espacial y sistemas de información geográfica. México.

Procedimiento de dimensionamiento de un generador fotovoltaico aislado de baja potencia que opera bajo condiciones de sombreado parcial

Michael Arenas Flórez¹

Juan David Bastidas Rodríguez²

¹*Unidades Tecnológicas de Santander*

²*Universidad Nacional de Colombia*
Colombia

En los procedimientos de dimensionamiento de un generador fotovoltaico GFV aislado de baja potencia, normalmente se considera el efecto de los sombreados parciales de forma simplificada y utilizando modelos simplificados del generador. Existen herramientas software de dimensionamiento como PVSYST, SAM, PVSOL y SOLARIUS, pero no utilizan modelos detallados del generador. Este trabajo presenta un procedimiento de dimensionamiento para un GFV aislado de baja potencia, que utiliza un modelo detallado del GFV operando en condiciones de sombreado parcial; se considera como caso de estudio una estación de carga de bicicletas eléctricas. El procedimiento inicia con un pre dimensionamiento usando un método simplificado; luego se realiza la estimación de la energía producida por el GFV hora a hora para un año, considerando el efecto de los sombreados parciales; después se realiza un proceso iterativo incluyendo las pérdidas por sombreado para validar el dimensionamiento, logrando suplir la carga dentro de un rango permitido; finalmente, se estima el banco de baterías y se selecciona un regulador de carga e inversor. El procedimiento se valida por simulación para un caso de estudio de un GFV aislado ubicado en un edificio. Los resultados se comparan con softwares de dimensionamiento comercial y muestran que el procedimiento propuesto evita la subestimación o sobreestimación del tamaño del GFV y demás elementos, lo cual es relevante en generadores aislados.

¹ Ingeniero Electricista y Magíster en Ingeniería eléctrica.

Contacto: marenasf@correo.uts.edu.co

² Ingeniero Electrónico y Doctor en Ingeniería de la Información.

Contacto: jubastidasr@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La energía fotovoltaica FV se ha establecido como una de las fuentes de energía renovable más importantes ya que cada año aumenta la capacidad instalada a nivel mundial. Además, los precios de los paneles fotovoltaicos se reducen cada año y los costos de mantenimiento son relativamente bajos [1]. Cuando todos los submódulos de un GFV operan bajo la misma irradiancia y temperatura, se dice que un GFV funciona en condiciones homogéneas. Sin embargo, en aplicaciones reales, los GFVs funcionan en condiciones no homogéneas debido a los sombreados parciales SP producidos por los objetos circundantes, la degradación de algunos submódulos, la suciedad, tolerancias de fabricación entre otros [2].

Según la Agencia Internacional de Energía, 32 países tenían al menos 1 GW de capacidad instalada FV a finales de 2018 y 10 países habían instalado al menos 1 GW en 2018; en 2018 el mercado fotovoltaico volvió a batir varios récords al alcanzar los 100 GW y en consecuencia, la capacidad acumulativa cruzó la marca de 500 GW en 2018, o medio TW [1]. Estos hechos justifican el creciente interés en la investigación de sistemas fotovoltaicos, particularmente en el modelado del efecto de los SP para analizar la eficiencia de los GFV, realizar estudios de evaluación de viabilidad y dimensionamiento de GFV.

Dado que los GFV que suministran energía a estaciones de carga de bicicletas eléctricas se instalan en zonas urbanas y pueden estar sometidos a condiciones de SP debido a los objetos cercanos, generando reducción en la eficiencia del sistema y deterioro de los paneles a largo plazo, además las sombras que se proyectan en los GFV son variables a lo largo del día y el año. Por tanto, surge la necesidad de conocer el impacto de la variación de los SP en la producción energética de un GFV y su incidencia en el procedimiento de dimensionamiento de un GFV.

Para el dimensionamiento de un GFV se encuentran diferentes procedimientos en la literatura. En la mayoría de los procedimientos se desprecian las pérdidas debidas a sombreados parciales en los paneles [3-5] y en algunos casos se consideran dentro de un factor de eficiencia global [6-8] lo cual no permite estimar adecuadamente el efecto de los SP sobre la producción energética, lo que puede producir un sobre o sub dimensionamiento del GFV.

En esta investigación se evalúa el impacto de los sombreados parciales, producidos por objetos circundantes, en el dimensionamiento de un GFV aislado de baja potencia en conexión serie paralelo que alimenta una estación de carga de bicicletas eléctricas para un caso de estudio. En esta investigación se considera el recurso solar de un año con paso horario y un modelado del GFV a nivel de submódulo con múltiples máximos en las curvas potencia-tensión.

2. MÉTODO

En este trabajo se presenta un procedimiento para el dimensionamiento de un GFV teniendo en cuenta las condiciones de sombreado parcial. Primeramente, se calculan las trayectorias solares y los contornos de los objetos cercanos que producen sombras. Luego, se propone un procedimiento para estimar los factores de sombreado de cada submódulo. Posteriormente, los datos del recurso solar y los factores de sombreado calculados se utilizan para alimentar un modelo detallado del módulo fotovoltaico (MFV) para estimar las curvas tensión-potencia (P-V) hora a hora, las cuales se utilizan para obtener un perfil de potencia y estimar la energía generada por el GFV en un año.

El procedimiento se valida por simulación para un caso de estudio disponible en la literatura para evaluar el efecto sobre la estimación de energía considerando o no sombreado parcial. Se propone comparar los resultados del procedimiento propuesto con los métodos tradicionales y softwares de dimensionamiento y así evitar la sobreestimación o subestimación de energía que afecta el tamaño del GFV.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se presenta un procedimiento para el dimensionamiento de un GFV de baja potencia aislado, incluyendo el sistema de almacenamiento (baterías), regulador de carga e inversor. Para este procedimiento se

implementa el modelo de un solo diodo para representar cada submódulo del GFV, esto permite mejorar la exactitud en el cálculo de las curvas P-V del GFV para cada instante de tiempo. Como caso de estudio se toma un MFV instalado en la terraza oriental del edificio Camilo Torres de la Universidad Industrial de Santander, y una estación de carga que alimenta una bicicleta eléctrica con un perfil de potencia.

El procedimiento se divide en cinco partes, en la primera parte se realiza un pre dimensionamiento básico, el cual permite estimar el tamaño inicial del GFV. En la segunda parte se calcula la potencia y energía del GFV seleccionado teniendo en cuenta el efecto de la variación de los SP. En la tercera parte se verifica si la energía esperada por el GFV logra suplir la energía de la carga (estación de bicicletas) y se realizan las iteraciones necesarias para lograr suplir la carga. Finalmente, en la cuarta y quinta parte se estima el almacenamiento basado en baterías y se selecciona el regulador de carga e inversor respectivamente. El procedimiento propuesto se presenta en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 1, la descripción de cada paso se encuentra en las siguientes subsecciones.

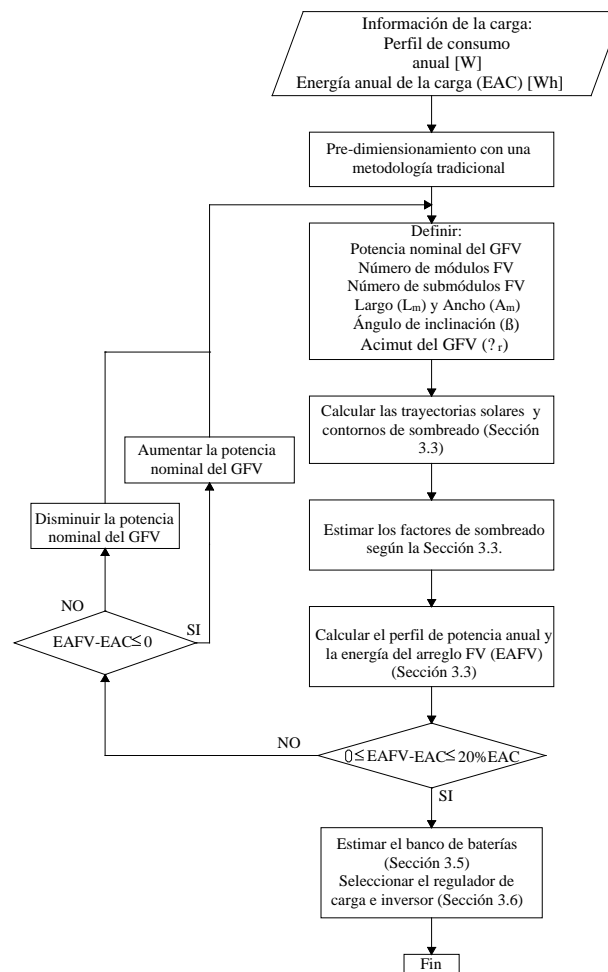


Figura 1. Procedimiento de dimensionamiento propuesto

3.1 Descripción del caso de estudio y la carga

Para la explicación del procedimiento de dimensionamiento propuesto se considera un caso de estudio con el fin de explicar con un ejemplo cada uno de los pasos presentados en la Figura 1. A continuación, se describe el caso de estudio con la información necesaria para explicar el procedimiento de dimensionamiento.

La ubicación definida para el GFV es la terraza oriental del edificio Camilo Torres de la Universidad Industrial de Santander latitud, longitud (7.14° N, -73.12° O); la geometría de la ubicación del GFV se aprecia en la Figura 2. En la Figura se aprecia dos muros los cuales proyectan SP al GFV, esto muros se pueden modelar a partir de los puntos clave PC1, PC2, PC3 y PC4; además se aprecian las distancias y la orientación geográfica con respecto al norte.

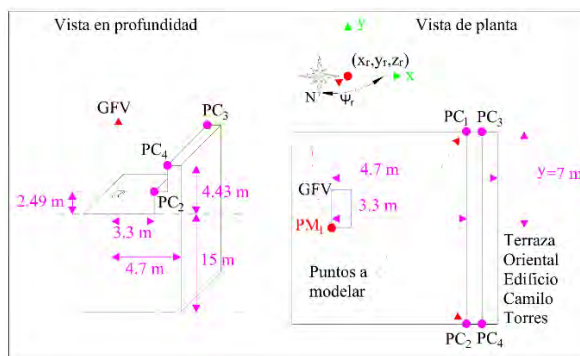


Figura 2. Geometría de la ubicación del GFV y los objetos que pueden proyectar sombras

En cuanto a la carga, para el presente trabajo se toma como caso de estudio una estación de carga que alimenta una bicicleta eléctrica a partir de datos tomados de [9]. El perfil de consumo promedio diario seleccionado se muestra en las Figuras 3 y 4.

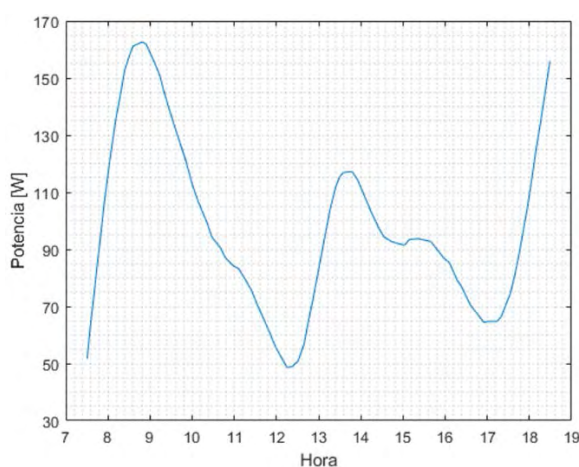


Figura 3. Perfil de consumo eléctrico diario E-BIKE, tomado de [9]

Tomando el perfil promedio diario de la Figura 3 y realizando un ajuste a una función polinómica, se estima los valores hora a hora del perfil promedio con el fin de obtener un perfil diario de consumo para la estación de carga de bicicletas considerada como caso de estudio, este proceso se observa en la Figura 4.

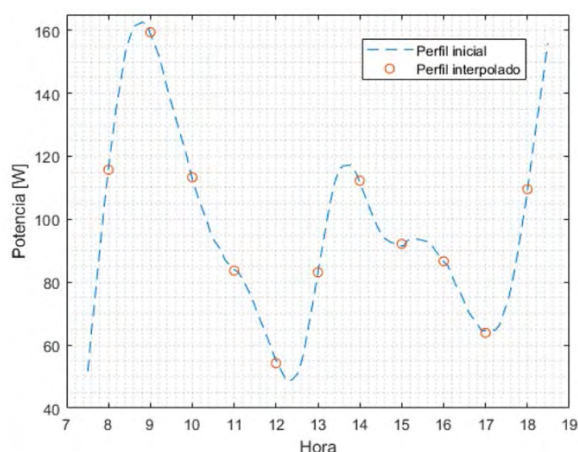


Figura 4. Perfil de consumo eléctrico diario E-BIKE interpolado

Finalmente, para estimar el perfil anual de la estación de carga de bicicletas se calcula la potencia nueva horaria (P_N) según la ecuación (1) a partir de la potencia del perfil promedio diario inicial (P_i). En la Ecuación (1) α_{ale} es un porcentaje de variación de la potencia instantánea que se define como se muestra en la Ecuación (2), donde α_d es un porcentaje de variación diaria considerado de $\pm 5\%$ y α_h es un porcentaje de variación horaria considerada de $\pm 15\%$. Esta metodología es la que se utiliza en el software HOMER Energy para el cálculo del perfil anual de potencia de una carga [10].

$$P_N = P_i * (1 + \alpha_{ale}) \quad (1)$$

$$\alpha_{ale} = \alpha_d + \alpha_h \quad (2)$$

Aplicando la metodología mencionada se obtuvo el perfil de consumo anual mostrado en la Figura 5.

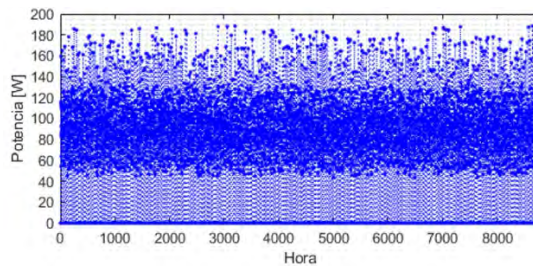


Figura 5. Perfil de consumo eléctrico anual E-BIKE

La Figura 6 muestra un zoom de los 5 primeros días estimados según la metodología presentada. En esta figura se verifica que la metodología implementada permite considerar una variación horaria y diaria del perfil de potencia de una estación de carga de bicicletas eléctricas conservando un consumo similar al promedio mostrado en la Figura 4.

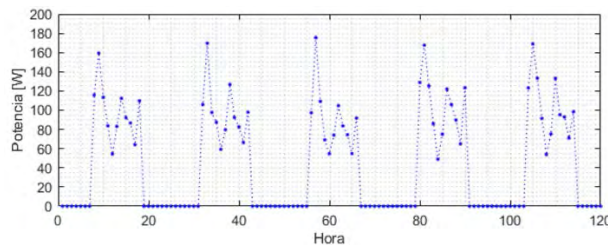


Figura 6. Perfil de consumo eléctrico 5 días E-BIKE

Además, para el caso de estudio en la Figura 7 se muestra el perfil anual hora a hora de la irradiancia global y directa [11], mientras que la Figura 8 muestra el perfil de irradiancia global y directa para los cinco primeros días del año de estudio.

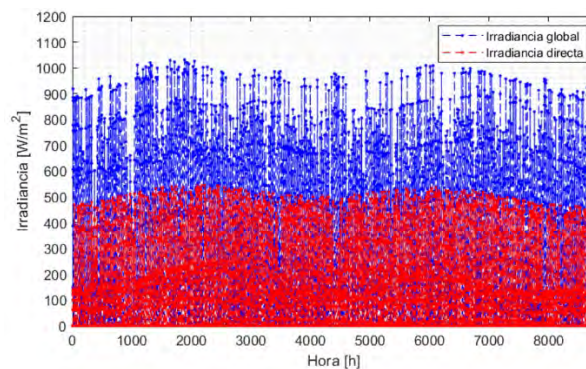


Figura 7. Perfil de irradiancia edificio Camilo Torres [11]

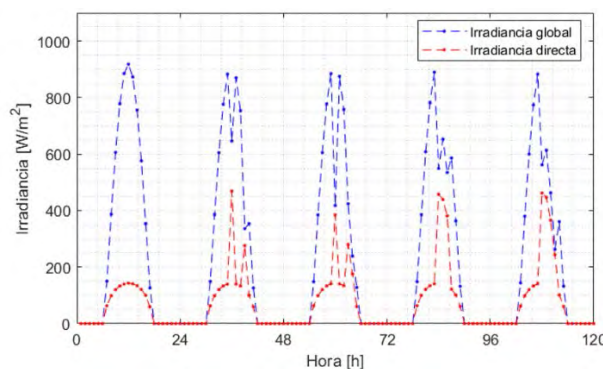


Figura 8. Zoom perfil de irradiancia 5 días edificio Camilo Torres [11]

En la Figura 9 se muestra el perfil anual de temperatura tomado de [11] y en la Figura 10 se muestra el perfil de temperatura para los cinco primeros días del año.

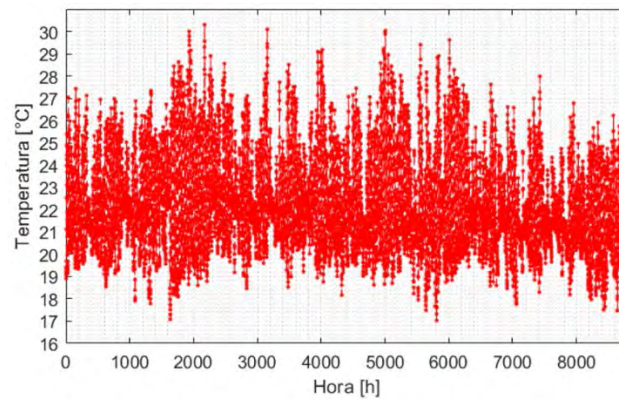


Figura 9. Perfil de temperatura, edificio Camilo Torres [11]

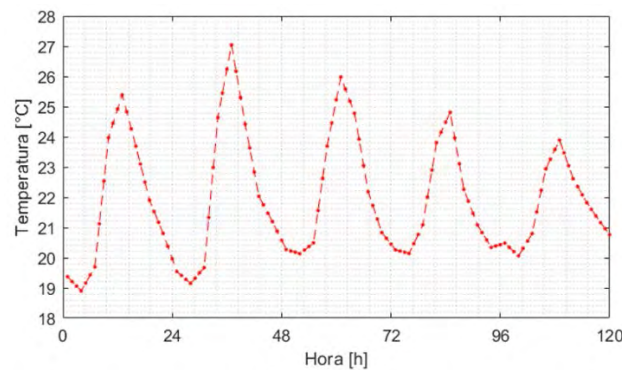


Figura 10. Zoom perfil de temperatura 5 días edificio Camilo Torres [11]

En la Tabla 1 se muestra el promedio mensual de las Horas Pico Solares (HPS) para el caso de estudio, las HPS representan la energía solar FV que se encuentra disponible en el sitio de instalación. Esta variable se calculó a partir de datos de [11]; se aprecia que en el mes 8 se tiene el valor mínimo o crítico y en el mes 3 se tiene el valor máximo.

Tabla 1. Horas Pico Solares promedio mensual

Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
4,94	5,12	5,68	5,12	5,19	4,86	4,99	4,73	5,01	5,12	4,92	4,93

3.2 Pre dimensionamiento

Se propone estimar un tamaño inicial del GFV basado en un dimensionamiento básico según la metodología propuesta en [5]:

1. El primer paso es conocer la carga (E_C) en [Wh], que se desea alimentar con el GFV, y luego se definen unos factores de dimensionamiento, por ejemplo, los mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores utilizados para el dimensionado de módulos fotovoltaicos

Nombre	Abreviatura	Valor
Eficiencia del ciclo de carga y descarga de las baterías	η_{CDB}	0,8
Disponibilidad de las baterías	DB	0,8
Eficiencia por pérdidas conductores	η_{PC}	0,9
Eficiencia por calentamiento de los módulos FV	η_{CP}	0,9
Eficiencia por efecto de SP	η_{SP}	0,9
Factor de sobredimensionamiento	F_s	0,15
Eficiencia del inversor	η_I	0,89
Eficiencia del regulador de carga (En carga y descarga)	η_{RC}	0,95

2. A partir de la ecuación (3) [5] se puede estimar la energía que debe producir el GFV (E_{TP}) en [Wh], para ello se utilizan los factores de la Tabla 1 y el valor de E_C . La potencia pico requerida en paneles (P_p) en [Wp], se estima a partir de la ecuación (4) [5], donde HPS corresponde al valor de las horas pico solares críticas consideras, que se pueden obtener de bases de datos como IDEAM, NASA, PVGIS entre otras.

$$E_{TP} = E_C * \frac{(1+F_s)}{\eta_{CDB} * \eta_{PC} * \eta_{CP} * \eta_{RC} * \eta_{SP} * \eta_I} \quad (3)$$

$$P_p = \frac{E_{TP}}{HPS} \quad (4)$$

3. Así mismo se puede estimar la capacidad de almacenamiento requerida (C_{AT}) en [Ah] a partir de la capacidad de almacenamiento (C_A) en [Wh] calculada según la ecuación (5) [5] donde D_B corresponde a la disponibilidad de las baterías o profundidad de descarga, D_A son los días de autonomía que se consideren y V_B es la tensión de diseño del sistema de almacenamiento.

$$C_A = \frac{E_{TP}}{365 * D_B} \quad (5)$$

4. Para el perfil de potencia anual de la Figura 5, $E_C = 390,5897 \text{ kWh}$ y aplicando los factores Tabla 1, $E_{TP} = 910,9352 \text{ kWh}$. Adicionalmente, el valor de las horas pico solares es $HPS = 4,7304$ y fue calculado para el mes crítico de datos tomados de [11]. Utilizando la ecuación (4) con los datos anteriores, se obtiene la potencia requerida en paneles $P_p = 192,5684 \text{ Wp}$, luego la potencia nominal del GFV será de 200W.
5. La capacidad de almacenamiento $C_A = 3.1196 \text{ kWh}$ se calcula utilizando la ecuación (5) y reemplazando C_A en la ecuación (6) [5] con $D_A = 3 \text{ días}$, tomado a partir del criterio de días sin brillo solar de la bases de del IDEAM [12]. Teniendo en cuenta que $V_B = 12 \text{ V}$, se calcula que la capacidad de almacenamiento requerida es $C_{AT} = 779,9103 \text{ Ah}$, entonces el banco de baterías inicialmente debe ser de 800Ah.

$$C_{AT} = \frac{C_A * D_A}{V_B} \quad (6)$$

3.3 Cálculo de potencia y energía

El MFV utilizado es el Trinasolar TSM-200DC/DA01A monocristalino-Si [13], que consta de 72 celdas agrupadas en 3 submódulos, con las siguientes características en STC: potencia en MPP $P_{mpp} = 200 \text{ [W]}$, tensión en MPP $V_{mpp} = 34,8 \text{ [V]}$, corriente en MPP $I_{mpp} = 4,23 \text{ [A]}$, tensión de circuito abierto $V_{oc} = 42,5 \text{ [V]}$, corriente de cortocircuito $I_{sc} = 4,5 \text{ [A]}$, eficiencia nominal $\eta = 15.6 \text{ [%]}$, y coeficiente de temperatura $\alpha_{isc} = 0.023 \text{ [%/}^\circ\text{C]}$, con $L_m = 1,58 \text{ [m]}$, $A_m = 0,81 \text{ [m]}$, $\beta = 20,32^\circ$.

Las trayectorias del sol en el plano E-A en Bucaramanga (Colombia), con latitud 7.14° ($\phi = 7,14^\circ$), longitud -73.12° ($L_{local} = -73,12^\circ$), y hora meridiana estándar -75° ($L_{zone} = -75^\circ$) se presentan en la Figura 11.

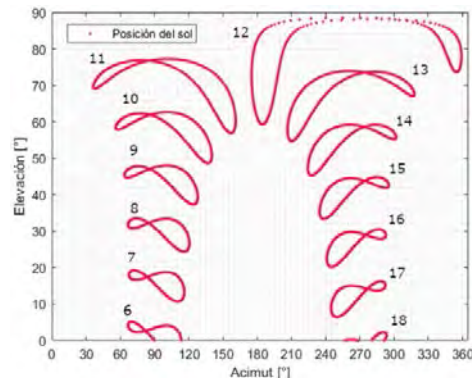


Figura 11. Trayectorias solares en Bucaramanga (Colombia): $\phi = 7,14^\circ$, $L_{local} = -73,12^\circ$ y $L_{zone} = -75^\circ$

Se tienen 8 esquinas en los submódulos (PM) para el MFV de 200W, similar al MFV mostrado en la Figura 12. A partir de la Figura 2 se pueden identificar los puntos clave (PC) de los objetos que podrían proyectar sombreados al GFV. Ahora, graficando los contornos de sombreados para cada PM del GFV, se obtienen los contornos presentados en la Figura 13.

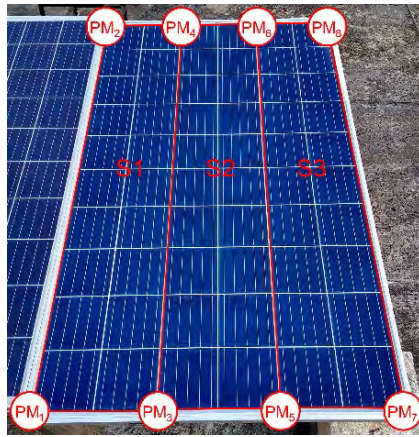


Figura 12. Número de puntos clave considerados en el módulo

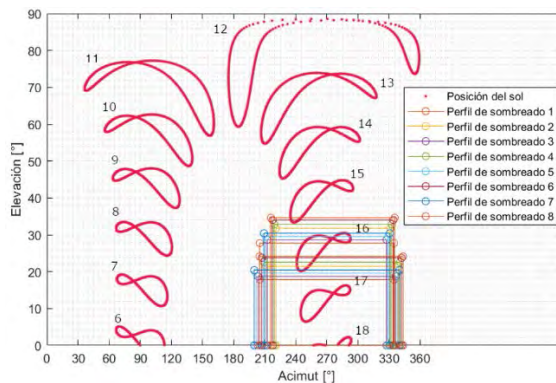


Figura 13. Trayectorias solares con objetos cercanos considerando 8 PMs, edificio Camilo Torres

El siguiente paso es estimar los factores de sombreado, para lo cual se propone utiliza la ecuación (7) donde G_g y G_d son la irradiancia global e irradiancia directa, que se encuentran comúnmente en bases de datos.

$$F_s = 1 - \frac{G_d}{G_g} \quad (7)$$

Seguidamente, para cada hora del año utilizando el procedimiento de cálculo de las curvas de Potencia-Voltaje (P-V) de un GFV propuesto en [14], se estiman las curvas P-V utilizando pasos de tensión de 1 V y se identifica el punto de máxima potencia global (GMPP) el cual se toma como la potencia máxima que el módulo puede generar en cada hora; también es posible considerar escenarios donde se identifiquen y seleccionen otros valores de la curva P-V por ejemplo máximos locales. En este trabajo se considera únicamente los puntos GMPP, las demás condiciones de operación se dejan como trabajos futuros.

Luego se toman los perfiles de irradiancia de la Figura 7 y el perfil de temperatura de la Figura 9 y se realiza el cálculo de la energía anual del GFV considerando el efecto de los SP debidos a objetos cercanos, de donde se tiene que la energía anual producida por el sistema fotovoltaico es $EAFV = 310,8959 \text{ kWh}$. Finalmente, las Figura 14 y 15 muestran el perfil de potencia anual obtenida con el procedimiento propuesto considerando el efecto del sombreado parcial.

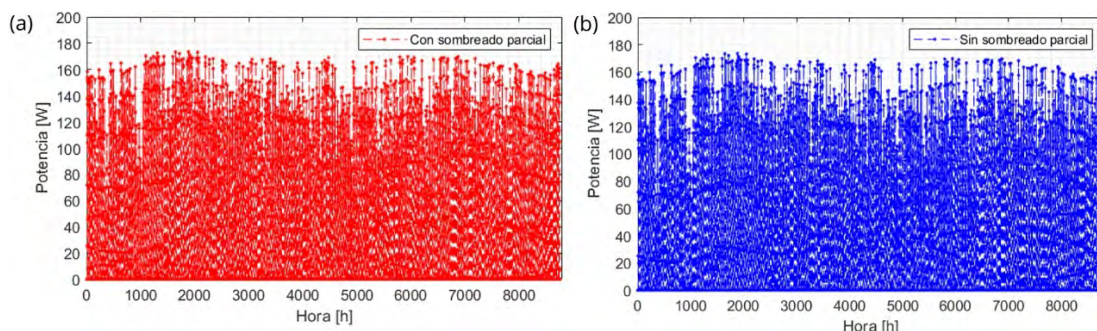


Figura 14. Perfil de potencia generada anual, edificio Camilo Torres GFV 200W: (a) considerando sombreado parcial, (b) sin considerar el sombreado parcial

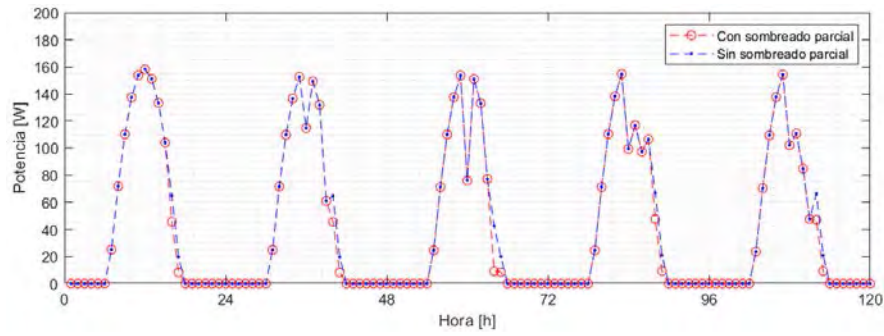


Figura 15. Zoom perfil de potencia anual 5 días, edificio Camilo Torres GFV 200W

El tiempo total de simulación fue de 1306.34 segundos es decir 21,77 minutos en un equipo con procesador Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz, memoria RAM de 16GB; luego se tiene aproximadamente un promedio de 3.57 segundos por día de simulación.

3.4 Verificación del dimensionamiento

En este paso se busca verificar si el GFV seleccionado con el predimensionamiento logra suplir la carga. Para ello se considera que el GFV es adecuado si $0 \leq EAFV - EAC \leq 20\%EAC$ donde EAC es la energía anual de la carga considerada, para el GFV considerado se tiene que $EAFV - EAC = -79.6938kWh$, es decir una diferencia $dif = -20,4\%$ de EAC , luego el GFV no logra suplir la carga y se debe probar con una GFV de mayor potencia. A partir la potencia nominal inicial del GFV (P_{iGFV}) como criterio se puede estimar el tamaño del siguiente GFV (P_{Nn}) con base en el incremento de potencia usando la ecuación (8) o en el incremento de energía usando la ecuación (9).

$$P_{Nn} = P_{iGFV} * (1 - dif) \quad (8)$$

$$P_{Nn} = \frac{1000 * EAC * (1 - dif)}{365 * HPS} \quad (9)$$

Aplicando la ecuación (8) se tiene que $P_{Nn} = 241W$, luego se selecciona un nuevo GFV, el MFV utilizado es el Trinasolar TSM-240 PC/ PA05 policristalino-Si [15], que consta de 60 celdas agrupadas en tres submódulos, con las siguientes características en STC: potencia en MPP $P_{mpp} = 240$ [W], tensión en MPP $V_{mpp} = 29,7$ [V], corriente en MPP $I_{mpp} = 8,10$ [A], tensión de circuito abierto $V_{oc} = 37,3$ [V], corriente de cortocircuito $I_{sc} = 8,62$ [A], eficiencia nominal $\eta = 15$ [%], y coeficiente de temperatura $\alpha_{isc} = 0.047$ %/°C, con $L_m = 1,65$ [m], $A_m = 0,99$ [m], $\beta = 16,85^\circ$. Nótese que en este caso de estudio el número de PM_s se mantiene (8 PM_s) dado que el MFV considera también tiene 3 sub módulos.

Nuevamente se estiman los factores de sombreado, se utiliza el perfil de irradiancia y el perfil de temperatura de según el procedimiento presentado y se obtiene el perfil de potencia anual el cual se aprecia en la Figura 16. La Figura 17 muestra un zoom de los primeros 5 días del perfil de potencia anual para el GFV considerado.

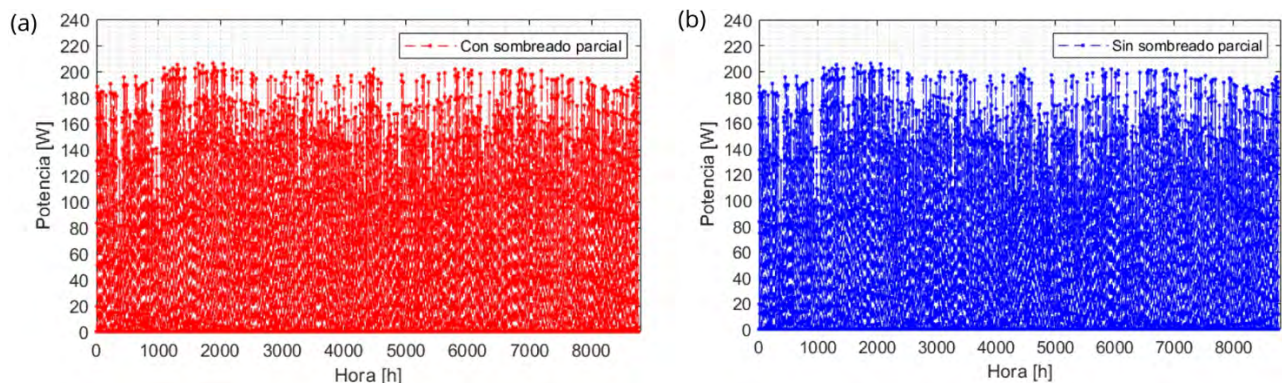


Figura 16. Perfil de potencia generada anual, edificio Camilo Torres GFV 240W, (a) considerando sombreado parcial, (b) sin considerar el sombreado parcial

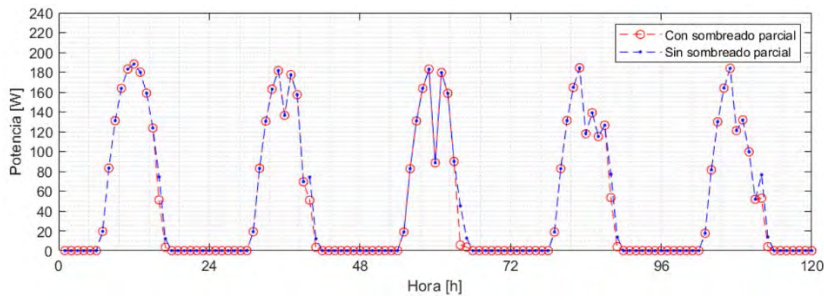


Figura 17. Zoom perfil de potencia anual 5 días, edificio Camilo Torres GFV 240W

El tiempo total de simulación fue de 1134.21 segundos es decir 18,90 minutos en un equipo con procesador Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz, memoria RAM de 16GB; luego se tiene aproximadamente un promedio de 3,10 segundos por día de simulación.

La energía anual del GFV calculada considerando el efecto del sombreado parcial debido a objetos cercanos es de $EAFV = 361,2149 kWh$, se tiene que $EAFV - EAC = -29,3748 kWh$, es decir un $diff = -7,52\%$ de EAC , luego el GFV no logra suplir la carga y se debe probar con una GFV de mayor potencia.

Aplicando la ecuación (8) se tiene que $P_{Nm} = 258W$, luego se selecciona un nuevo GFV, el MFV utilizado es el Trinasolar TSM-270 PD05 policristalino-Si [16], que consta de 60 celdas agrupadas en tres submódulos, con las siguientes características en STC: potencia en MPP $P_{mpp} = 270 [W]$, tensión en MPP $V_{mpp} = 30,9 [V]$, corriente en MPP $I_{mpp} = 8,73 [A]$, tensión de circuito abierto $V_{oc} = 37,9 [V]$, corriente de cortocircuito $I_{sc} = 9,22 [A]$, eficiencia nominal $\eta = 16,5 [\%]$, y coeficiente de temperatura $\alpha_{isc} = 0.05 \%/^{\circ}K$, con $L_m=1,65 [m]$, $A_m=0,99 [m]$, $\beta= 17.52^{\circ}$. Nótese que para este caso de estudio el número de PM_s se mantiene (8 PM_s) dado que el MFV considerado también tiene 3 submódulos. Nuevamente se obtiene el perfil de potencia anual el cual se aprecia en la Figura 18. La Figura 19 muestra un zoom de los primeros 5 días del perfil de potencia anual para el GFV considerado.

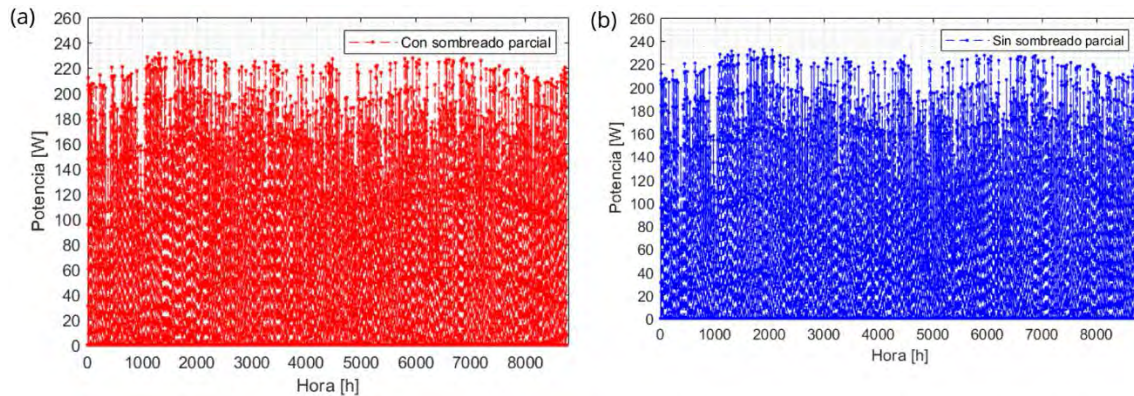


Figura 18. Perfil de potencia generada anual, edificio Camilo Torres GFV 270W, (a) considerando sombreado parcial, (b) sin considerar el sombreado parcial

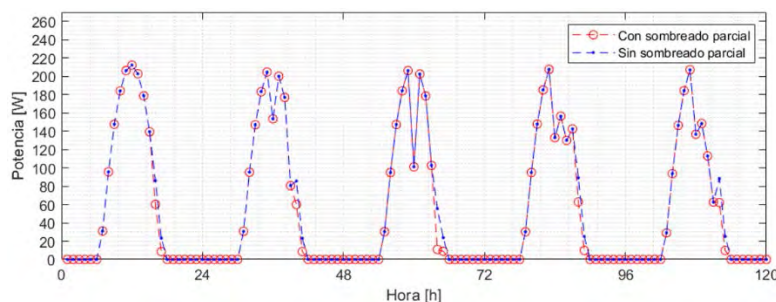


Figura 19. Zoom perfil de potencia generada anual, edificio Camilo Torres GFV 270W.

El tiempo total de simulación fue de 1186.31 segundos es decir 19.77 minutos en un equipo con procesador Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz, memoria RAM de 16GB; luego se tiene aproximadamente un promedio de 3.25 segundos por día de simulación.

La energía anual del GFV calculada considerando el efecto del sombreado parcial debido a objetos cercanos es de $EAFV = 413.4125 \text{ kWh}$, se tiene que $EAFV - EAC = 22.8233 \text{ kWh}$, es decir un $dif = 5,84\%$ de EAC , luego el GFV logra suplir la carga. Si se desea se puede probar otros MFV para lograr un dif según el criterio que se considere adecuado; es importante aclarar que el perfil de potencia obtenido para los tres GFVs ha sido calculado tomando un escenario optimista donde la estrategia MPPT logra estimar el GMPP.

3.5 Estimación del almacenamiento basado en baterías

Para estimar el sistema de almacenamiento existen diferentes metodologías por ejemplo la mencionada previamente, en este trabajo se propone utilizar el perfil de potencia del GFV (Figura 18) y el perfil de potencia de la estación de carga (Figura 5) para estimar el perfil de potencia de entrada en las baterías expresado como la diferencia entre el perfil de potencia del GFV y el perfil de la carga (Figura 20).

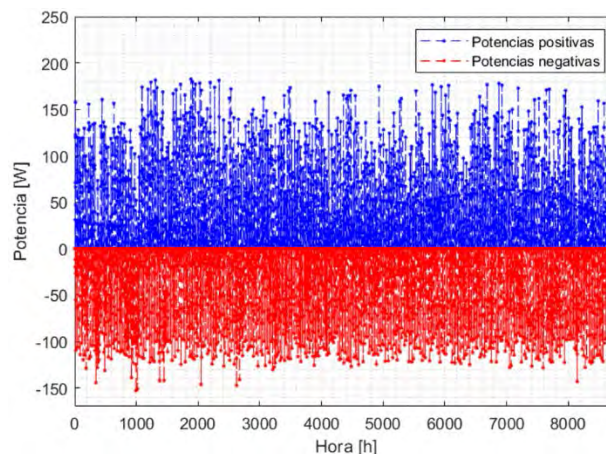


Figura 20. Perfil de potencia anual sistema de almacenamiento

Las potencias positivas (color azul) corresponden a las horas en las cuales la potencia del GFV es superior a la de la carga, luego las baterías entran en estado de carga; las potencias negativas (color rojo) corresponden a las horas en las cuales la potencia del GFV es menor que la de la carga, entonces las baterías entran en estado de descarga. Del perfil de potencia anual del sistema de almacenamiento (Figura 20), se seleccionan las potencias negativas como el caso crítico para el dimensionamiento de las baterías, esta selección se toma considerando que las baterías deben ser capaces de entregar la energía que se requiere, garantizando que durante todo el año se supla la carga.

En la Figura 21 se aprecia el comportamiento horario de las baterías para el caso más crítico (día 340) en el cual se aprecia que la energía total del día es mayor en las potencias negativas (área bajo la curva) luego las baterías deben ser capaces de entregar esta energía a la carga.

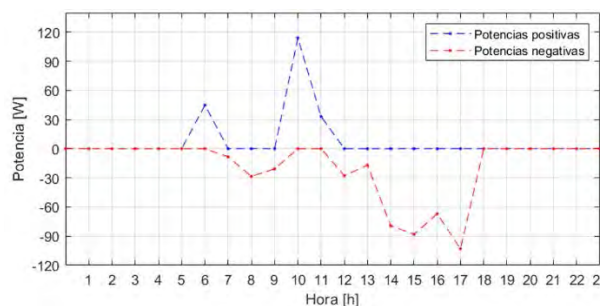


Figura 21. Perfil de potencia sistema de almacenamiento en un día

Luego se estima el valor de energía de la parte negativa para todos los días del año y se toma el día con el valor máximo ($E_{neg_m\acute{a}x}$), como el valor crítico para calcular el tamaño del sistema de almacenamiento en Ah como se muestra en la ecuación (10) adaptada de [5]; esta ecuación permite considerar los principales factores que afectan el tamaño requerido de las baterías, por ejemplo las pérdidas carga y descarga, pérdidas en conductores, disponibilidad de las baterías entre otros.

$$CAB = \frac{E_{neg_m\acute{a}x} \cdot DA \cdot (1 + F_s)}{V_B \cdot D_B \cdot \eta_{CDB} \cdot \eta_{PC} \cdot \eta_{RC} \cdot \eta_I} \quad (10)$$

Se tiene que en el día 340 del año de estudio se presenta el valor máximo $E_{neg_m\acute{a}x} = 757.5541 \text{ Wh}$, y con los factores de la Tabla 2 se obtiene que $CAB = 447.2140 \text{ Ah}$, entonces el sistema de almacenamiento puede formarse a partir de tres baterías de descarga profunda de 150Ah con tensión de 12V y en conexión paralelo.

3.6 Selección del regulador de carga e inversor

Para seleccionar adecuadamente un regulador de carga y un inversor se deben verificar algunas características básicas, las cuales se pueden consultar en la ficha de características técnicas del fabricante.

3.6.1 Selección del regulador de carga

- *Tecnología:* MPPT significa que el seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) busca encontrar la tensión de trabajo del conjunto de módulos FV para obtener la máxima producción posible. La tecnología PWM no permite buscar el MPP del GFV; por lo tanto, se prefiere la tecnología MPPT, aunque suele tener un costo superior.
- *Tensión de carga de las baterías:* $V_B = 12V$.
- *Máxima corriente de carga* o capacidad máxima del regulador en (A), suele venir expresada en el nombre del regulador.

Para estimar la corriente máxima de carga, se divide la potencia nominal del GFV (P_{GFV}) sobre la tensión de la batería, como lo muestra la ecuación (11).

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{P_{GFV}}{V_B} \quad (11)$$

Para el caso de estudio, reemplazando $P_{GFV} = 270 \text{ W}$ y $V_B = 12 \text{ V}$, se tiene que $I_{m\acute{a}x} = 22.5 \text{ A}$.

- *Tensión máxima:* se debe conocer la tensión de circuito abierto del GFV ($V_{oc} = 37,9 \text{ V}$), dado que no se debe superar la tensión máxima que el regulador de carga permite.

Una de las posibles alternativas es un controlador MPPT, con tensión de carga para las baterías de 12V, corriente máxima de carga nominal $I_{m\acute{a}x} = 30A$, tensión máxima de circuito abierto 100V.

3.6.2 Selección del inversor

- *Tecnología:* en general se encuentra dos tipos que son inversor de onda senoidal pura (PWM) e inversor de onda senoidal modificada (MSW). El primero es más costoso, pero la distorsión armónica es más baja; mientras que el segundo presenta menor costo y mayor distorsión armónica.
- *Tensión de entrada* o de las baterías: $V_B = 12V$.
- *Tensión de salida* en corriente alterna: $V_{sal} = 115V$.
- *Potencia nominal* (P_{NI}): suele estimarse como un rango tal que $0,8 \cdot P_{GFV} \leq P_{NI} \leq 1,2 \cdot P_{GFV}$, para el caso de estudio $216W \leq P_{NI} \leq 324W$.

Una de las posibles alternativas es un inversor PWM, con tensión de carga para las baterías de 12V, tensión de salida de 115V, potencia nominal 300W. La Figura 22 muestra un esquema del resultado dimensionamiento para el caso de estudio analizado, considerando el esquema de sistema aislado adaptado de [9]. El esquema presentado en la Figura 22 es comúnmente utilizada por su flexibilidad, dado que permite alimentar estaciones de carga aisladas e incluso permite una conexión a la red, además permite instalar tomacorrientes en corriente alterna para otros usos. Es importante mencionar que el procedimiento propuesto permite considerar otras configuraciones de las estaciones de carga de bicicletas eléctricas.

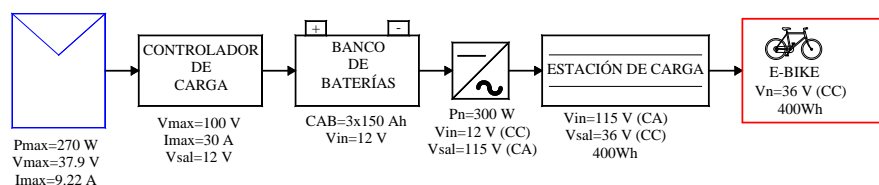


Figura 22. Esquema del sistema aislado, caso de estudio

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un procedimiento de dimensionado basado en el modelo FV de un solo diodo el cual permite una estimación adecuada del perfil de potencia hora a hora y la energía esperada del GFV para una carga considera evitando sobredimensionar o sub dimensionar el tamaño de este. El procedimiento de dimensionamiento propuesto permite considerar el efecto de la variación de los SP asociados a objetos cercanos en un GFV de baja potencia que alimenta una estación de bicicletas eléctricas. Además, permite considerar la ubicación espacial del GFV, incluido el ángulo de inclinación. Además, se presenta una alternativa adecuada para el cálculo de los factores de sombreado, que se requieren para usar el modelo del GFV que opera en condiciones de sombreado parcial.

El procedimiento propuesto permite la estimación directa de la potencia generada, la energía generada y las pérdidas de energía de un GFV de baja potencia en conexión serie paralelo con alta precisión ya que se utiliza un modelo del MFV preciso. Los resultados de la simulación demuestran que las pérdidas de potencia causadas por las condiciones de sombreado no son insignificantes, y deben calcularse con precisión para mejorar el análisis de viabilidad de un proyecto fotovoltaico.

Comparado con otros procedimientos, el procedimiento propuesto cuenta con una estimación más detallada de los efectos de los SP y tiene la opción de utilizar un modelo que permite estimar múltiples máximos en las curvas P-V del GFV e incluso permite estimar factores de sombreados por submódulo para cada hora de análisis.

Los resultados de este trabajo muestran que se logra una estimación adecuada de la capacidad nominal requerida en baterías lo que evita sobredimensionar aproximadamente un 73% este elemento, lo cual es relevante dado que para sistemas aislado suele ser el que presenta mayores costos iniciales, de operación y mantenimiento. así mismo el procedimiento propuesto se evita un sobredimensionamiento de las pérdidas de energía debidas a SP.

REFERENCIAS

- [1] Masson G. et al. (2019). A Snapshot of Global PV Markets - The Latest Survey Results on PV Markets and Policies from the IEA PVPS Programme in 2018. En IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).
- [2] Petrone G. et al. (2017). PV Models. Photovoltaic Sources Modeling. John Wiley.
- [3] Kulworawanichpong T. y Mwambeleko J. (2015). Design and costing of a stand-alone solar photovoltaic system for a Tanzanian rural household. Sustain Energy Technol Assessments 12, 53-59.
- [4] Aparicio MP. (2010). Energía solar fotovoltaica: Cálculo de una instalación aislada. Marcombo.
- [5] Messenger R. y Ventre J. (2004). Photovoltaic Systems Engineering. Taylor & Francis.
- [6] Spertino F. et al. (2015). A power and energy procedure in operating photovoltaic systems to quantify the losses according to the causes. Sol Energy 118, 313-326.
- [7] Kaushika N. et al. (2005). Simulation model for sizing of stand-alone solar PV system with interconnected array. Sol Energy Mater Sol Cells 85, 499-519.
- [8] Bouabdallah A. et al. (2015). Safe sizing methodology applied to a standalone photovoltaic system. Renew Energy 80, 266-274.
- [9] Thomas D. et al. (2015). Implementation of an e-bike sharing system: The effect on low voltage network using pv and smart charging stations. En International Conference on Renewable Energy Research and Applications.
- [10] Homer Energy LLC. (2020). Homer energy. Recuperado: <https://www.homerenergy.com/>
- [11] PVGIS. (2019). Photovoltaic Geographical Information System. Recuperado: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#
- [12] IDEAM. (2020) Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. Recuperado: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

- [13] Trinasolar. (2020). Datasheet module TSM-DC01A. Recuperado: https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Comax_DC01A_Datasheet_Feb13_EN.pdf
- [14] Bastidas J. et al. (2019). Mismatched Series-Parallel Photovoltaic Generator Modeling: An Implicit Current-Voltage Approach. *IEEE J Photovoltaics* 9, 768-774.
- [15] Trinasolar. (2020). Datasheet module TSM-240 PC/ PA05. Recuperado: https://static.trinasolar.com/sites/default/files/PC05_Datasheet_40mm_EN.pdf
- [16] Trinasolar. (2019). Datasheet module TSM-PD05. https://static.trinasolar.com/sites/default/files/EN_TSM_PD05_datasheet_B_2017_web.pdf

Metodología para pronosticar las demoras en las salidas de los vuelos regulares programados utilizando herramientas predictivas

Juan Gerardo Muros Anguita¹

Oscar Díaz Olariaga²

¹ *Universidad de Granada*
España

² *Universidad Santo Tomás*
Colombia

Las demoras se han transformado en una constante en el sistema de transporte aéreo internacional, conduciendo a la caída de la satisfacción del cliente y a la generación de un volumen relevante de costos, que afecta tanto a los actores de la industria como a la economía en general. En consecuencia, es necesario anticipar y mitigar la existencia de retrasos que ayuden, por un lado, a que los aeropuertos mejoren su desempeño y, por otro lado, que las aerolíneas puedan cumplir con su programación de horario, en otras palabras, ser lo más puntuales posibles. Por lo tanto, la predicción, lo más precisa posible, de las demoras se ha vuelto indispensable de cara a mitigar la generación y proliferación de las mismas, y evitar su propagación a otros aeropuertos de la red. Pero como tanto la función de dependencia del tiempo de demora como las variables *inputs* de las que depende no son conocidas plenamente, el objetivo de esta investigación es predecir las demoras en las salidas de los vuelos regulares programados, a través de una metodología que utiliza herramientas predictivas basadas en Machine Learning/Deep Learning ML/DL, con entrenamiento supervisado en regresión, a partir de los datos de vuelos disponibles. El aporte novedoso de este trabajo es realizar, por un lado, la comparativa de las predicciones en términos de medias y varianza estadística de los diferentes modelos ML/DL implementados (10 en total) y, de otro lado, determinar los coeficientes de importancia de los atributos de vuelo, utilizando métodos ML conocidos como Permutation Importance. Esto permite ordenar la importancia de los atributos de vuelo por su influencia en la determinación del tiempo de demora y reducir el problema a la selección de los atributos más importantes del vuelo. Los datos para el análisis se obtuvieron del sistema aeroportuario colombiano completo para todo 2018. De los resultados obtenidos, el modelo que presenta mejores prestaciones es el método Ensemble o combinatorio de modelos tipo Random Forest Regressor, configurado con 2000 árboles dentro del bosque con un rango de predicción medido con la métrica RMSE de entre 16 y 33 minutos (de predicción en el tiempo de la demora de las salidas de los vuelos), según sea el escenario analizado.

¹ Ingeniero Aeronáutico.

Contacto: ejuangerardo@go.ugr.es

² Doctor en Ingeniería Aeronáutica.

Contacto: oscardiazolariaga@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de transporte aéreo a nivel mundial ha tenido un crecimiento vertiginoso en las últimas tres décadas [1, 2], para dar respuesta a esta demanda, las aerolíneas exigen de los aeropuertos cada vez más disponibilidad (en infraestructura) para operar más rutas y frecuencias. La industria aeroportuaria mundial ha dado respuesta a esta demanda, con la permanente ampliación de sus infraestructuras e incluso con la construcción de nuevos aeropuertos con un ingente volumen de inversión, tanto pública como privada [3]. Pero ambas velocidades no han sido iguales, en definitiva, en muchos aeropuertos del mundo la capacidad ofrecida o instalada no puede satisfacer enteramente la demanda, esta situación ha generado primero, la congestión del aeropuerto, y como consecuencia de ello la aparición de las demoras [4, 5, 6]. Por ello, muchos estudios, tanto técnicos como académicos, afirman que la demora es un concepto que está íntimamente vinculado a la capacidad del aeropuerto [7-9].

Ahora bien, ¿qué se entiende exactamente por demora y cómo se mide? Antes de dar una respuesta a dicha pregunta mencionar que el sistema de transporte aéreo tiene varios actores o participantes, los tres más importantes (desde el punto de vista operacional): los aeropuertos, las aerolíneas, y el sistema de gestión del tráfico aéreo ATM, y cada uno de los mismos tiene sus propias políticas y estrategias operativas [10, 11]. Por ello, no se puede imputar el problema de la demora solo y únicamente a la operación aeroportuaria (o la gestión de su capacidad), es más, tampoco se puede imputar el problema de la demora solo a la operatividad de estos tres actores, ya que existen otros factores externos que influyen en la aparición o agravamiento de las demoras, una de las más importantes, la adversidad de la climatología [12-14].

Por otro lado, cada país del mundo tiene su propia política regulatoria (de control y seguimiento de la actividad) de su sistema de aviación civil, como así también políticas de gestión de su infraestructura de transporte aéreo. Todo esto hace difícil, sino imposible, que exista un estándar o norma universal que defina y regule el concepto de demora por igual en todo el mundo [15]. Asimismo, y por obligada necesidad, cada actor del sistema de transporte aéreo (y en cada país) gestiona el problema de las demoras según sus propias estrategias operativas. Y esto ha conducido a que, a nivel mundial, y siguiendo ciertos ejemplos o iniciativas, se adopte un criterio coordinado sobre cómo gestionar la demora, y que la misma pueda ser escalable entre aeropuertos, tanto a nivel local/nacional como internacional.

Además, a los entes reguladores nacionales de la aviación comercial (u organismos de control y seguimiento) vigilan cada vez más la calidad del servicio aéreo, y es donde el concepto de puntualidad entra en escena, que al final y al cabo, se podría interpretar como un indicador de desempeño [16]. Entonces, autoridades aeroportuarias (u organismos similares) en muchos países, adoptando recomendaciones o sugerencias de organizaciones nacionales o supranacionales de referencia de la industria, implementan el criterio de que un vuelo comercial (programado) es puntual si el mismo inicia (o termina) dentro de los 15 minutos (positivo o negativo) con respecto a la hora programada, de lo contrario, ese vuelo parte o llega con demora [17-19].

La aplicación de este estándar puede ser ligeramente diferente en algunos países en lo que se refiere a la interpretación exacta de los 15 minutos, es decir, en algunos casos la puntualidad se acepta hasta los 15 minutos 59 segundos, y en otros la puntualidad se acota a los 14 minutos 59 segundos. Las partidas anticipadas (a veces llamadas demoras negativas) no se pueden considerar una demora, pero según los tiempos de dicha anticipación pueden causar ciertos problemas en las operaciones del aeropuerto. Las salidas inesperadas pueden interrumpir la secuencia de vuelos de salida y las llegadas anticipadas pueden influir en la asignación de puestos de estacionamiento en plataforma [20].

Para completar la respuesta a la pregunta inicial queda por fijar a partir de qué suceso u operación se cuenta el tiempo que conduce a que un vuelo se considere puntual o demorado. Nuevamente, a nivel mundial existen varios criterios sobre dónde empezar a contar el tiempo, cada organismo regulador nacional, e incluso cada autoridad aeroportuaria específica, define su política al respecto, un primer estándar muy utilizado es: para los salidas (despegues) la hora programada (de referencia) se compara con la hora exacta (y real) del remolque o retroceso (*push-back*) (momento en que el tractor o remolque inicia el retiro de la aeronave de su puesto de estacionamiento en la plataforma); y en un segundo estándar, la hora

programada se compara con el denominado tiempo real de fuera-calzas (*actual off-block time* AOBT). Y el retraso de llegada se suele calcular como la diferencia entre la hora programada de llegada y la hora real de puestas o bloqueo de calzas (*actual on-block time* AIBT) en el estacionamiento en plataforma [21-23].

Como se mencionó anteriormente, las demoras pueden tener orígenes diversos, por lo que para los planificadores y gestores aeroportuarios como así también los organismos reguladores nacionales del servicio de transporte aéreo, es muy importante conocer los motivos de las demoras. Este conocimiento, por un lado, ayuda a los gestores aeroportuarios a generar estrategias operacionales para su mitigación o minimización y, por otro lado, para los agentes reguladores o de control del servicio de transporte aéreo, a identificar responsables de las demoras y los actores perjudicados, y en su caso aplicar oportunas penalizaciones u obligatoriedad de compensaciones económicas o similares a los actores afectados.

Para ello, es común en muchos países adoptar (o adaptar) el Standard IATA Delay Codes-AHM 730 [24], en donde se especifican y codifican todos los posibles motivos que generan una demora. En principio, allí están codificados todas las posibles causas a las que se puede asociar una demora, las mismas están asociadas (por grupos) a las operaciones de la aerolínea, del aeropuerto, de ATFM, causas meteorológicas, y otras causas diversas (seguridad, inmigración, aduana, directrices gubernamentales, etc.) [24].

El volumen de las demoras ha ido creciendo, en las últimas dos décadas, no solo en su magnitud, sino también en su negativo impacto económico, principalmente en términos de costes [25-29]. En el primer concepto, en el sistema de aviación de los Estados Unidos, en 2019, el 18,87% de todos los vuelos del sistema tuvieron una demora [30]. En Europa, en 2019, el 46,4% de todos los despegues partieron con demora (cualquiera sea el motivo de la demora), y el promedio (temporal) de dichas demoras (de todos los vuelos que partieron demorados, y con respecto a la hora programada de partida) fue de 28,4 minutos [31].

En Colombia, país-caso de aplicación de la presente investigación, en 2019 el 28,60% y el 22,54% de los vuelos domésticos e internacionales respectivamente partieron con demora. Y en lo que se refiere al impacto económico de las demoras, según estimaciones de la [32], el costo generado por las demoras en el sistema de aviación de Estados Unidos, en 2019, fue de USD 33 mil millones (incluido todo concepto). En Europa, el coste total de las demoras, para 2012, se estimó en EUR 11,2 mil millones (en todo concepto) [33]. Y en Colombia, el coste de las demoras, solo para las aerolíneas (y solo en concepto de compensaciones a pasajeros), en 2019, fue de USD 6,5 millones [34].

En base a lo comentado, y de la cada vez más relevante problemática de las demoras de los vuelos, la academia viene aportando investigaciones al respecto, y desde diferentes vertientes (caracterización, distribución, propagación, predicción, costes, estrategia corporativa, etc.), desde hace al menos veinte años. En lo que se refiere exclusivamente al estudio de la predicción de las demoras de vuelos programados (materia de estudio del presente capítulo), el mismo se ha analizado con diferentes planteamientos y metodologías. Los planteamientos utilizados por los académicos se pueden agrupar en al menos seis grupos preponderantes [35-38]:

1. *Análisis estadístico*: modelos de regresión, análisis de correlación, modelos econométricos, Monte-Carlo, pruebas paramétricas, pruebas no paramétricas y análisis multivariante MVA.
2. *Modelos probabilísticos*: los cuales abarcan, o incluyen, herramientas de análisis que estiman la probabilidad de un evento basándose en datos históricos.
3. *Análisis de red*: principalmente teoría de grafos, aunque estudios relacionados con el análisis de redes bayesianas también se incluyen en esta categoría.
4. *Investigación de operaciones*: que comprende métodos analíticos avanzados como optimización, simulaciones y teoría de colas.
5. *Machine Learning con predicción en regresión*: donde los métodos más usados incluyen k-Nearest Neighbor, Recurrent NN, Cascade NN, Deep Learning CNN and LSTM, SVM, fuzzy logic y Random Forests.
6. *Machine Learning en predicción en clasificación binaria*: demorado/no demorado y de multiclases (¿diferentes niveles de demora, donde dos métodos de clasificación comúnmente utilizados incluyen

Decision Trees y Naive Bayes, la mayoría de los modelos de conjuntos, como el Random Forest, se incluyen en esta categoría.

Entonces, el objetivo de la presente investigación es predecir las demoras en las salidas (despegues) de los vuelos regulares programados, usando los datos de la red aeroportuaria completa de Colombia (país-caso de estudio) (58 aeropuertos) y que contempla los datos de 357.595 salidas (despegues) de vuelos para el año 2018 completo (periodo de estudio), se contemplan tanto salidas domésticas como internacionales. Para ello, y como metodología, se usan herramientas predictivas basadas en Machine Learning/Deep Learning ML/DL, con entrenamiento supervisado (es decir, se conocen las demoras de los vuelos del dataset usados en el entreno y test) en predicción en regresión (dará un número real de tiempo de demora esperable para la salida de un vuelo).

Siendo la aportación novedosa de este trabajo el realizar, por un lado, la comparativa de las predicciones en términos de media y varianza estadística según los modelos diferentes de ML/DL implementados (10 en total), por lo que se podrá elegir el óptimo de entre ellos; y de otro lado, determinar los coeficientes de importancia de los *features* o atributos de vuelo, utilizando métodos ML conocidos como Permutation Importance [39, 40], lo que permite ordenar la importancia de los atributos de vuelo por su influencia en el tiempo de demora y filtrar los atributos menos importantes del vuelo. Finalmente, los todos los modelos ML/DL son reentrenados para analizar sus nuevas prestaciones al usar el dataset reducido con los atributos seleccionados por los modelos.

2. MÉTODO

2.1 Datos

Para la presente investigación se dispone de una base datos de salidas (despegues) de vuelos comerciales regulados programadas, domésticos e internacionales, de la red aeroportuaria colombiana completa (58 aeropuertos) y del todo 2018, lo que constituye un conjunto de 357.595 vuelos y con un total de 5.721.520 datos (al contener cada dato de vuelo 16 variables (o *features*) asociadas).

Cada vuelo de salida tiene asociada la siguiente información relevante (*feature*): a) tipo de tráfico (doméstico o internacional), b) aerolínea, c) aeropuerto de origen (siempre nacional), d) aeropuerto de destino (nacional o internacional), e) número de vuelo (vinculado a la aerolínea, ruta y frecuencia de dicho vuelo), f) fecha programada de salida, g) hora programada de salida, h) fecha de remolque (*push-back*), i) hora de remolque (*push-back*), j) la demora horaria, k) demora expresada en minutos, l) situación del vuelo, m) estado de la salida (según estándar de la autoridad aeroportuaria del país), n) código de la demora (según el Standard IATA Delay Codes-AHM 730 [24]), donde cada código (89 posibles) se asocia a un motivo exacto que genera o provoca dicha demora, o) motivo de la demora, p) observaciones asociadas al vuelo o su demora (por parte de la autoridad aeroportuaria).

2.2 Tipología de modelos implementados

Los modelos Machine Learning/Deep Learning ML/DL representan matemáticamente unos tipos de aproximadores universales [41] de la función f , tal que cumpla: $Y = f(X)$. Entonces, en el presente trabajo se proponen y utilizan diez modelos ML/DL para mapear la salida Y (tiempo de la demora) con los inputs X (atributos del vuelo que pueden ser hasta nueve en su versión más extensa del dataset); aunque de estos diez modelos solo se desarrolla y utiliza un solo modelo tipo DL, el denominado Multi Layer Perceptrón (MLP) [42].

El modelo MLP, cuya arquitectura se muestra en la Figura 1, ha sido generado usando las librerías keras/tensorflow, que consistente en dos capas densas (conexiones de todas las neuronas de la capa anterior con todas las neuronas capa posterior) de 9 neuronas (obsérvese que coincide con el número de inputs) en la primera capa y 36 neuronas en la segunda, usando la función de activación Rectified Linear Unit ReLU [43-46] para que las neuronas puedan aprender las relaciones no lineales entre la salida y la entrada (de cada neurona).

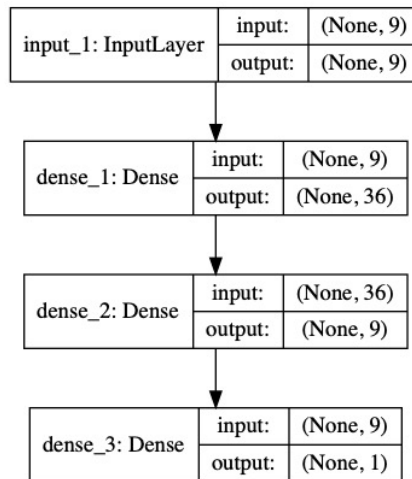


Figura 1. Arquitectura tipo de capas y neuronas del modelo MLP desarrollado

La función ReLU se define como: $y = \max(0, x)$, donde y representa la salida de la neurona y x la entrada de la neurona. La función ReLU tiene varias ventajas, su computación es fácil y por tanto los tiempos de entreno son cortos, converge rápido sin presentar saturaciones (problema que si se presenta cuando se usan otras funciones de activación como la sigmoide y la tangente hiperbólica) por tener una salida lineal, no presentan los problemas de desvanecimiento de gradiente (que hacen que no se actualizan los pesos del modelo por ser cuasi-nulas las derivadas de sensibilidad de pesos), se activan de forma escasa (*sparsity*) lo que simplifica las conectividades o acoplamientos existentes entre todas neuronas, y finalmente, permite que el modelo ML/DL aprenda las relaciones no lineales entre la entrada x y la salida y .

El resto de los modelos desarrollados en el presente trabajo para entrenar los datos son los siguientes: Support Vector Machine SVR que son muy robustos tanto en predicciones lineales como en no lineales, lo que consiguen aumentando el espacio dimensional de los features [47]; el Random Forest RFR que son métodos tipo ensemble que mejoran los resultados de cualquiera de sus algoritmos constituyentes más simples por combinaciones de estos [48, 40]; el Modelo de Regresión Lineal Simple LIR [49]; el modelo Bagging Gradient BGR que mejora las predicciones produciendo multi-grupos por combinaciones y repeticiones [50, 51, 52]; el Extreme Gradient Boosting XGR, el cual a partir de modelos más débiles generan modelos más fuertes usando el gradiente descendiente como método optimizador [53, 54]; el Huber Regressor HBR, que es muy robusto entrenando los datos con *outliers* (o valores atípicos) al penalizarlos a través de funciones de coste *ad hoc* [55, 56]; el Extra Trees ETR, que implementa muchos más árboles de decisión para ajustar mejor el aprendizaje que los métodos de árboles decisión simples DTR [57, 58]; el Decision Trees DTR que es el modelo simple de árboles de decisión pero que se vuelven a reutilizar debido a su capacidad auto-explicativa de los patrones aprendidos por el ML [59]; el K- Nearest Neighbors KNR que predice en función de sus K vecinos más próximos [60]. La R al final del nombre de todos los modelos indica que los modelos se han implementado en configuración Regression.

En los escenarios implementados en esta investigación, los modelos que presentan mejores prestaciones, en términos de menor Root-Mean-Square Error RMSE, son los de tipo Random Forest; estos modelos presentan un mejor rendimiento que, por ejemplo, los modelos MLP de redes neuronales artificiales ANN (el cual es un modelo *per se* más complejo al ser del tipo DL) debido a que o bien no se ha llegado a optimizar la arquitectura del MLP aquí implementada (en términos de número y tipo de capas de neuronas, y de la cantidad de neuronas presentes en cada capa), o bien porque los otros modelos que no son Deep Learning simplifican el análisis y obtienen ventajas generalistas al ser más robustos.

Para clarificar esta circunstancia, hay que recordar que los modelos más simples generalizan mejor al ser menos sensibles frente al ruido de los *inputs*, matrices que no tratan de captar por su naturaleza simple, lo que sirve para suavizar la función de mapeo buscada, frente a los modelos más complejos que por tratar de retener más detalles e información pierden capacidad de generalización durante el aprendizaje, lo que los convierte en fuertemente dependientes del conjunto de datos de entreno. En otras palabras, los modelos más complejos suelen tener más precisión (menor sesgo), pero son más sensibles a la varianza del

conjunto de datos elegido para su entreno. En cambio, los modelos más simples suelen tener peor precisión (mayor sesgo), pero al generalizar mejor presentan menor varianza a la elección del conjunto de datos empleado en su entreno. En resumen, que un modelo más complejo como el MLP que es del tipo DL, puede estar requiriendo un mayor ajuste en términos de número, tipo de capas neuronales y número de neuronas por capa, así como el uso de dataset más complejos en el sentido de que dispongan más atributos por vuelo para utilizar toda su potencialidad.

2.3 Entrenamiento de los modelos ML/DL

El entrenamiento de los modelos forma parte del proceso central del ML. En este trabajo se han entrenado separadamente cada uno de los 10 modelos ML/DL con el dataset y bajo dos versiones cada escenario, el primer escenario con 10 features y el segundo otro con solo seis features (con el objetivo de evaluar si se pueden simplificar los atributos de partida del dataset). Otra aportación a destacar de este trabajo es haber realizado los entrenos estadísticos mediante la implementación de las técnicas de k-fold y cross-validation, para asegurar de que no existen sesgos en el entrenamiento por haber elegido un subconjunto en especial del dataset para el entreno y otro para la validación o evaluación de las prestaciones.

El entrenamiento se ha implementado dividiendo el dataset en lotes de 128 muestras cada uno, al cabo de los cuales el modelo ML/DL, procesando los datos hacia adelante (desde los inputs hasta la capa de salida), predice o estima los valores de salida, momento en el que vuelve hacia atrás (desde la capa salida a la capa entrada de inputs) para actualizar los pesos (conexiones entre neuronas) de todas las neuronas de todas las capas del modelo, a través del método de Backpropagation [61-63]. Este método de propagación del error hacia atrás, parte del error total obtenido a través de la función de coste definida, aquí se usa el Root Mean Square Error RMSE, resultante de comparar los valores estimados (del lote) por el modelo con los valores reales recogidos por el dataset (del mismo lote).

Este proceso nuclear del aprendizaje de los modelos ML representa la distribución del error total entre las diferentes contribuciones que hacen todos los peso o nodos del modelo, lo que se realiza a su vez mediante el método del descenso del gradiente estocástico SGD [64-66]. El método del SGD calcula las derivadas parciales del error frente a cada uno de los pesos, lo cual constituye una forma de medir las sensibilidades del error respecto a cada uno de los pesos de la red neuronal artificial. El adjetivo estocástico del método SGD procede de que el gradiente es calculado por lotes elegidos aleatoriamente y no para todo el dataset.

Las ecuaciones correspondientes a las redes perceptrón multicapa MLP [42, 67] son las asociadas a las capas de neuronas, con una primera capa correspondiente a la entrada (representadas por el tensor \mathbf{X}), y una última capa de salida (asociada al tensor \mathbf{Y}), entre las que se intercalan las capas ocultas que se deseen implementar. Cada capa contiene un número variable de neuronas (o nodos), que pueden ser activadas con las funciones de activación, las cuales pueden ser de varios tipos [68]. El de entrada y salida a una neurona se muestra esquemáticamente en la Figura 2.

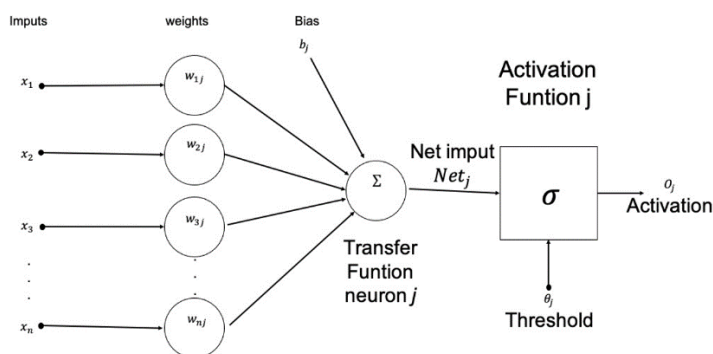


Figura 2. Conexiones de neuronas de redes MLP [69]

En la Figura 2 x_i representan los inputs del feature i de la capa de entrada, w_{ij} representa el peso o ponderación del feature i de la capa anterior en conexión con la neurona j de la capa posterior, Σ representa la función de transferencia (suma de todas las entradas provenientes de las salidas de todas las neuronas

de la capa anterior con la neurona j corregidas con el sesgo (o bias) b_j de la capa j , lo que produce la salida neta (función transferencia + sesgo) Net_j .

A continuación, a cada neurona se le aplica la función de activación σ elegida (p.e. tanh o sigmoide, aunque aquí se ha elegido ReLU), la cual produce a su vez la salida O_j . A partir de aquí se establecen de nuevo las conexiones de la salida de esta neurona, junto a todas las neuronas de su capa, con las neuronas de la capa siguiente, hasta llegar a la última capa de salida Y_j (que pueden ser varias neuronas de salida, aunque en el caso de predicción por regresión se constituye por una única neurona). Este flujo de entrada-salida se denomina flujo o propagación hacia delante (desde la capa de entrada pasando por todas las neuronas de las capas intermedias, hasta la capa de salida final). θ_j el valor umbral de la neurona j , para activar su función de salida (para el caso de existir).

En este trabajo se ha usado para la función de coste el RMSE. La ecuación (1) define dicho error, donde E es el error y n el número de muestras del dataset, $y(x)$ es la salida real (proporcionada por el dataset en aprendizaje supervisado) e $\hat{y}(x)$ es la salida estimada por el modelo.

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_x \|y(x) - \hat{y}(x)\|^2} \quad (1)$$

En ML, a partir de la función de coste, se implementa el proceso fundamental para el ajuste automático de los pesos del modelo, denominado backpropagation BP [61], el cual calcula el gradiente de dicho error total (en este caso RMSE) con respecto a cada uno de los pesos o conexiones de las neuronas de cada capa del modelo, para lo que aplica la regla de la derivación en cadena, a fin de propagar dicho error hacia atrás, para repartir el error entre todos los pesos del modelo, neurona a neurona, capa a capa. Con ello, se busca que el nuevo ajuste de pesos del modelo produzca un error menor cuando se itere con el siguiente lote de muestras de entrada X . Si el problema converge, dicho error se va haciendo cada vez menor o asintótico (estable), como es el caso analizado aquí.

Esta es la esencia del ML, minimizar alguna función de pérdidas (coste o error) ajustando las contribuciones de los pesos de las conexiones de neuronas a dicho error mediante una nueva incorporación de datos de aprendizaje o iteración sobre el dataset, aprendizaje que queda suficientemente garantizado al utilizar el método del gradiente SGD por los teoremas de la existencia de la derivación nula en los puntos de mínimo error. El grupo de ecuaciones (2) muestra la regla de la cadena de derivación en las redes ANN [70, 71].

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial o_j} \frac{\partial o_j}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial o_j} \frac{\partial o_j}{\partial net_j} \frac{\partial net_j}{\partial w_{ij}} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial net_j}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial}{\partial w_{ij}} \left(\sum_{k=1}^n w_{kj} o_k \right) = \frac{\partial}{\partial w_{ij}} w_{ij} o_i = o_i \quad (2b)$$

Los problemas de la búsqueda de mínimos de la función de coste se implementan a través de diferentes optimizadores, genéricamente conocidos como del gradiente estocástico descendente SGD [68]. Estos optimizadores tratan de evitar que la solución quede atrapada en alguno de los mínimos locales que presenta la función de coste cuando esta no es una función convexa. Para lo que cada uno de ellos ha implementado diferentes estrategias para buscar el óptimo global.

En el presente trabajo se ha usado uno de los optimizadores más eficientes, en el sentido de alta velocidad de convergencia y estabilidad robusta, conocido como estimación del momento adaptivo ADAM [69], el cual es una versión mejorada del RMSProp que implementa una velocidad (o paso de aprendizaje) variable/adaptativa y un momento o inercia que trata de evitar quedar atrapado en los mínimos locales de la función de coste. El grupo de ecuaciones (3) describe la actualización de los pesos por el optimizador ADAM [69].

$$m_w^{(t+1)} \leftarrow \beta_1 m_w + (1 - \beta_1) \nabla_w l^{(t)} \quad (3a)$$

$$v_w^{(t+1)} \leftarrow \beta_2 v_w^{(t)} + (1 - \beta_2) (\nabla_w l^{(t)})^2 \quad (3b)$$

$$\hat{m}_w = \frac{m_w^{(t+1)}}{1+\beta_1^{(t+1)}} \quad (3c)$$

$$\hat{v}_w = \frac{v_w^{(t+1)}}{1+\beta_2^{(t+1)}} \quad (3d)$$

$$w^{(t+1)} \leftarrow w^t - \eta \frac{\hat{m}_w}{\sqrt{\hat{v}_w + \epsilon}} \quad (3e)$$

donde $w^{(t+1)}$ representan los pesos en la iteración $t+1$, η la velocidad o paso de aprendizaje, $\nabla_w l^{(t)}$ representa el gradiente de la función de coste l con respecto a los pesos, ϵ un valor mínimo para evitar dividir por 0 (en keras se usa 10^{-7}), β_1 y β_2 son los factores de olvido para el gradiente o primer momento y el segundo momento respectivamente, $m_w^{(t+1)}$ es la media móvil de los pesos o primeros momentos en la iteración $t+1$, $v_w^{(t+1)}$ es la varianza móvil (o segundo momento) de los pesos en la iteración $t+1$. Las variables con sombrero indican que son estimadores y los superíndices con la variable t corresponden a cada una de las iteraciones (o ciclos de aprendizaje).

Este es el proceso de ajuste del modelo MLP/DL. En cambio, en los modelos basados en arboles de decisión el ajuste se hace, principalmente, por métodos de inducción y poda (*pruning*) de los árboles de decisión [72, 73]. El proceso de aprendizaje del dataset, se repite en este trabajo 150 veces (iteraciones) para todo el dataset y solo para el modelo DL de MLP (consideradas como suficientes para alcanzar un valor asintótico o estable del RMSE), lo que marca el máximo ajuste fino posible del modelo en el aprendizaje del dataset, o hasta que se obtiene el suficiente ajuste del error para el caso del resto de los modelos no DL, caracterizados por ser del tipo ensemble o boosting o stacking, donde los mismos perfeccionan a los modelos más simples de árboles de decisión por combinaciones de estos [50].

Para darle más robustez al valor de las métricas que se obtienen del RMSE, como ya se ha mencionado, se han empleado técnicas k-folds [74, 75], en concreto se han usado tres grupos para dividir el dataset entre tres formas diferentes de agrupar los datos de entreno y test. Los datos de entrenamiento, como su nombre lo indica, se usan para entrenar el modelo y los de test para evaluar las prestaciones del aprendizaje del modelo, pero sin que vea los datos de test durante el aprendizaje, para darle objetividad a la evaluación.

Además, con las técnicas de cross-validation se repiten estos entrenos un número variable de veces. Con todo ello se caracteriza el RMSE de cada modelo ML/DL, en términos de media y desviación típica, de la forma más robusta posible frente al caso de cuando se usa una sola configuración de grupos de entreno y test. Hay que enfatizar que todos estos métodos son de naturaleza estocástica, tanto por el uso del gradiente descendente estocástico SGD, como por la propia naturaleza estocástica de los dataset, por lo que sus resultados no son determinísticos, sino que tienen una distribución de probabilidad.

2.4 Examen estadístico de los features

Antes del entreno de los datos, se aplicaron diferentes exámenes o controles estadísticos diferentes, pero solo a los features numéricos, usando diferentes métodos para cada tipo de test, con el objeto de determinar si las distribuciones de features son de tipo gaussiano, lo que se realiza con ayuda de los tests Shapiro-Wilk, D'Agostino y Anderson-Darling; si son independientes o no están correlacionados con la salida, con los tests Pearson lineal, Spearman Rank, Kendall Rank, y Chi-Cuadrado; si no son estacionarios, con el test ADFuller; o si son igual a la distribución de salida, con test de Student, Paired Student, Anova, Mann-Whitney U, Kruskal-Wallis H, y Friedman. Estos tests de caracterización estadística de los features sirven para saber, entre otras cosas, si se facilitará su aprendizaje. Con estas caracterizaciones de los features o atributos de vuelo, se procederá a seleccionar la preparación de los datos del dataset antes del entreno, como son los procesos por transformaciones, escalados, etc. para facilitar el entreno.

2.5 Determinación de la importancia de los atributos (feature) de la salida (departure)

Para determinar la importancia que tienen los atributos del vuelo en la determinación del tiempo de demora del vuelo, se usa el método de Permutation Importance PI [39, 40], consistente en aplicar técnicas de

inspección para estimadores entrenables, donde cada modelo propuesto y configurado para este trabajo ofrece una respuesta diferente en cuanto a la selección de los features más significativos de los vuelos. El método PI consiste básicamente en permutar aleatoriamente los feature entre sí y medir para cada caso cómo varía la salida (tiempo de demora) a través del entrenamiento del nuevo dataset (permutado) con cada modelo ML/DL, lo cual permite establecer el coeficiente de importancia o sensibilidad del output (tiempo demora) frente a cada feature j denominado c_j (ecuación (4)).

$$c_j = s - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s_{k,j} \quad (4)$$

Donde: s es el resultado del entreno del modelo ML cuando se entrena con el dataset D sin permutar. A continuación, cada feature j asociado a una columna del dataset D se permuta aleatoriamente con las otros features para producir una versión permutada del dataset $\tilde{D}(j, k)$ donde el subíndice k representa las repeticiones con las que se han gestionado los features, siendo K el número máximo de permutaciones, y $s_{k,j}$ el nuevo resultado del entreno del modelo ML para cada feature j repetido k veces con el dataset permutado $\tilde{D}(j, k)$.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Antes de entrenar los 10 modelos ML/DL implementados, se procede a la eliminación de los datos outliers (o valores atípicos) del dataset, puesto que en caso de retenerlos obliga a los modelos a que aprendan patrones marginales de dichos atributos, lo que se hace en detrimento de una buena generalización en la predicción del tiempo de demora del vuelo. En este trabajo se han utilizado cuatro métodos para identificar y eliminar los outliers, dos de los cuales son métodos ML no supervisados, como son los métodos Local Outlier Factor y One Class SVM, los cuales agrupan en clúster los datos normales y marcan como datos atípicos a aquellos que quedan fuera de esos perímetros de valores normales.

El tercer método es el de Isolation Forest que aplica teoría de árboles de decisión binarios que no requieren pre-agrupar en perfiles de normalidad, por lo que es más rápido y eficiente en la detección de los outlier. El cuarto método es Elliptic Envelope [76] que calcula los outliers por el método del determinante de la covarianza mínima, el cual debe cumplir con la condición de aplicabilidad de que el número de muestras (vuelos) sea mayor que el cuadrado de los features, lo cual se cumple en este caso. Posteriormente, la evaluación del aprendizaje de los 10 modelos ML/DL se ha realizado para varios escenarios de selección de atributos de vuelo, a fin de mostrar la sensibilidad en el aprendizaje y predicción de los modelos según que atributos se elijan. En la Tabla 1 se recoge la lista general de los 16 atributos de vuelo del dataset con sus acrónimos de uso.

Tabla 1. Lista de atributos de cada vuelo.

Variable	Descripción
TRF	Tipo de tráfico (doméstico / internacional)
AEL	Aerolínea
ORI	Aeropuerto de origen (de despegue o salida)
DES	Aeropuerto de destino
NVU	Número del vuelo
FPS	Fecha programada de salida (despegue)
HPS	Hora programada de salida (despegue)
FRM	Fecha de push-back (remolque)
HRM	Hora de push-back (remolque)
DEA	Tiempo (o duración) de la demora (según estándar de la autoridad aeroportuaria)
DEM	Tiempo real de la demora (en minutos)
EVU	Estado del vuelo (en hora / demorado)
CDE	Código de la demora (según el Standard IATA Delay Codes-AHM 730)
MDE	Motivo de la demora (según el Standard IATA Delay Codes-AHM 730)
OBS	Observaciones (de la autoridad aeroportuaria)
EAC	Estado final del vuelo (en hora, demorado, temprano, cancelado, según estándar de la autoridad aeroportuaria)

Los resultados comparativos de las prestaciones RMSE obtenidas para el escenario 1 considerado al seleccionar los 10 features: TRF, AEL, ORI, DES, NVU, CDE, MDE, OBS, EAC y DEM, donde los 9 primeros son

inputs de entrada y el último es el output a predecir (DEM es el tiempo de demora en minutos), para cada uno de los 10 modelos, se muestra en la Figura 3. Donde se observa que las prestaciones medidas con la métrica RMSE son muy parecidas para todos los modelos y su valor está por debajo del 0,5, salvo el comportamiento de dos modelos más dispersos MLR y SVR. Siendo el modelo RFR el de mayores prestaciones con un RMSE de 0,449 y con un valor de desviación típica de 0,0013, lo que da una idea de que es un modelo robusto (baja varianza).

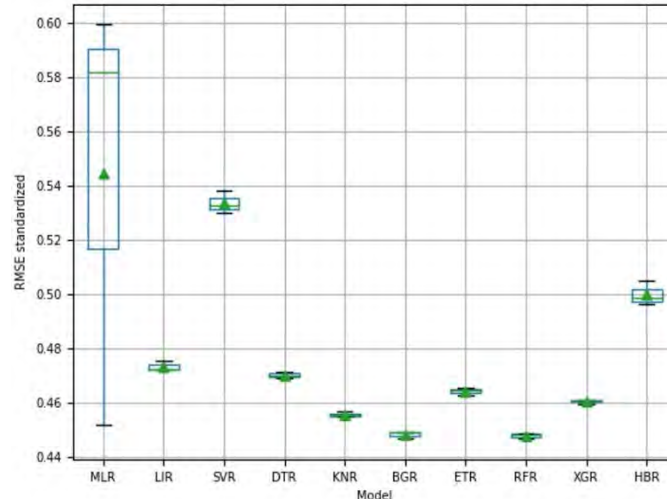


Figura 3. Comparativa RMSE resultante del aprendizaje obtenido para cada uno de los 10 modelos, transformando el feature tiempo de demora en una distribución estándar (de media 0 y desviación típica 1), referido al escenario 1 resultante de elegir 10 features, 9 de inputs: TRF, AEL, ORI, DES, NVU, CDE, MDE, OBS, EAC, y 1 de salida DEM

Hay que recordar que el feature DEM se ha estandarizado para facilitar el aprendizaje de los modelos ML/DL. Por lo que la Figura 4 muestra los resultados del RMSE pero ya en su escala original de tiempos de demora en minutos (lo que se hace invirtiendo el proceso de estandarización realizado al DEM), y en el que se aprecia que los errores de predicción (en su escala natural de minutos) son inferiores a 16 minutos (para el mejor modelo RFR). Es decir, que al introducir los 9 atributos mencionados de vuelo se predice un tiempo de demora que tiene un error inferior a 16 minutos, lo cual es un resultado notable para los features considerados.

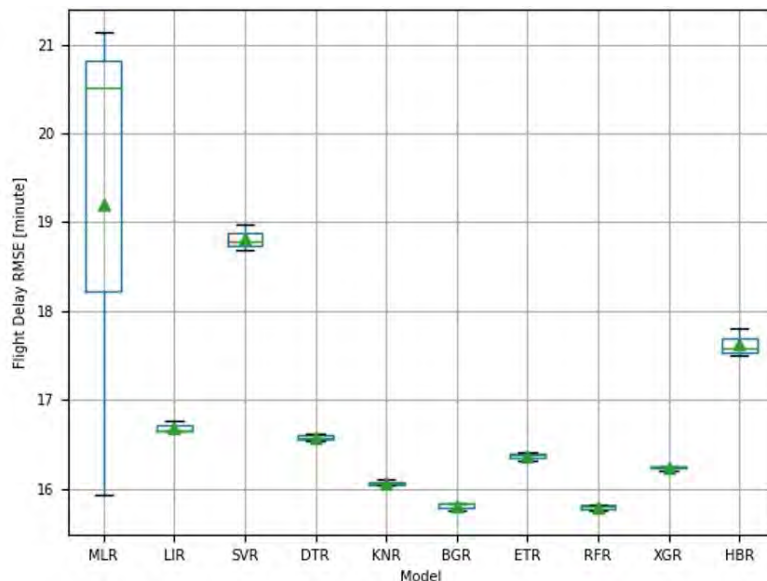


Figura 4. Comparativa RMSE resultante del aprendizaje obtenido para cada uno de los 10 modelos, en su escala original de minutos de demora, referida al escenario 1 de elegir 10 features, 9 de entrada: TRF, AEL, ORI, DES, NVU, CDE, MDE, OBS, EAC, y 1 de salida DEM

A continuación, se genera el escenario 2 resultante de aplicar el método Permutation Importance mediante el cual cada uno de los 10 modelos ML/DL auto-seleccionan los 5 mejores features que determinan el

tiempo de demora, de entre los 9 features inputs iniciales del escenario. Es decir, cada modelo ordena a los features inputs por su importancia en la determinación del tiempo de demora, asignándoles un coeficiente (relativo) de importancia. En la Figura 5 se observa el ranking de importancia asignada por el modelo RFR a los 9 features de entrada, donde los 5 últimos son los más importantes: ORI, AEL, NVU, CDE, EAC.

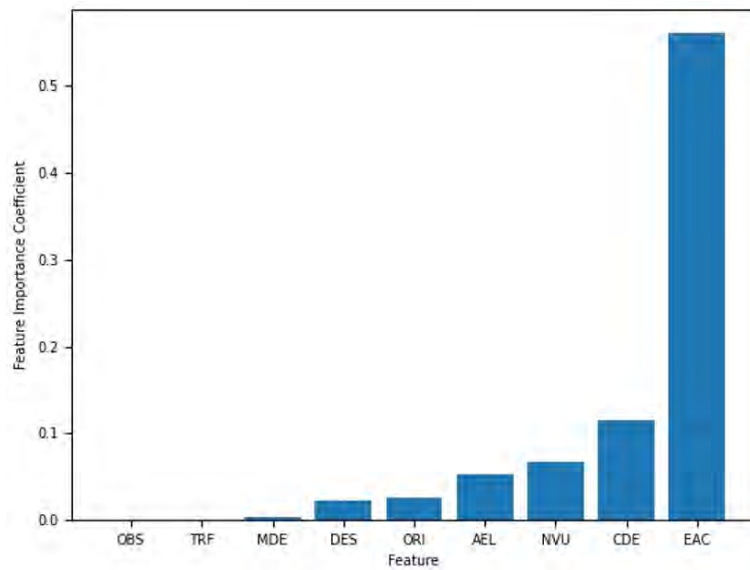


Figura 5. Coeficientes relativos de la importancia, por orden creciente, de los 9 features considerados como inputs del escenario 1, para determinar el tiempo de demora de vuelo DEM

Para evaluar la calidad de la selección de los 5 features más importantes: EAC, CDE, NVU, AEL, ORI (ordenados ahora en orden decreciente) por parte de los modelos, se les vuelve a entrenar con este nuevo escenario 2 reducido a los 5 features de entrada mencionados y 1 de salida DEM, a fin de comparar el aprendizaje de los modelos con respecto al escenario 1. Los resultados de la precisión del error obtenido RMSE en este escenario reducido 2 se muestran en la Figura 6, donde se observa que son los mismos que los obtenidos al emplear los 10 features del escenario 1; de hecho, el RMSE mejora levemente para el escenario 2, lo que demuestra que los patrones de aprendizaje se simplifican cuando los modelos usan los features reducidos más significativos que cuando usan un conjunto mayor de features.

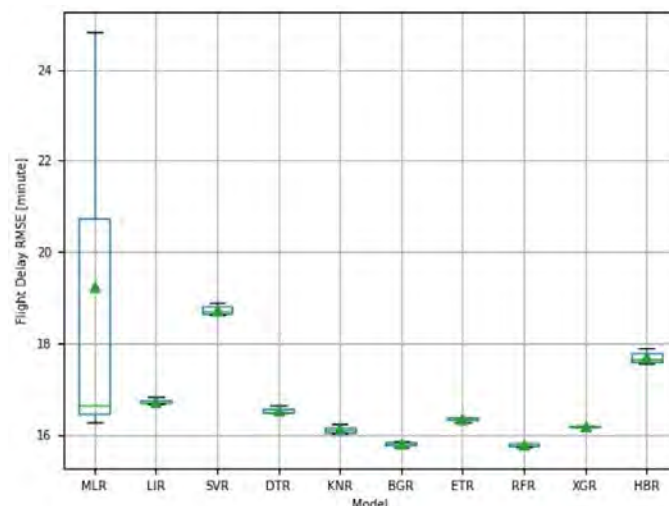


Figura 6. Resultados comparativos del RMSE obtenidos por los 10 modelos ML/DL cuando se entrenan solo con 5 features, correspondientes al escenario 2 reducido del dataset

Dado que tanto en el escenario 1 como el 2 (reducido) intervienen una serie de atributos que son medidos a posteriori, y por tanto no son conocidos de antemano, como son EAC, CDE, MDE y OBS, a fin de que estas predicciones realizadas con estos modelos sobre salidas de vuelos programados sean lo más realistas posibles y sirvan para predecir las demoras de esos vuelos antes de despegar, en este trabajo se ha decidido eliminar dichos 4 features del dataset. En particular, el escenario 3 queda ahora definido únicamente por 6

features, 5 de los cuales son inputs: TRF, AEL, ORI, DES, NVU, y 1 output DEM. Tras su entreno se obtiene un RMSE de 33,8 minutos por parte del mejor modelo RFR (aproximadamente el doble que cuando se retenían los 4 features eliminados), resultado que se muestra en la Figura 7.

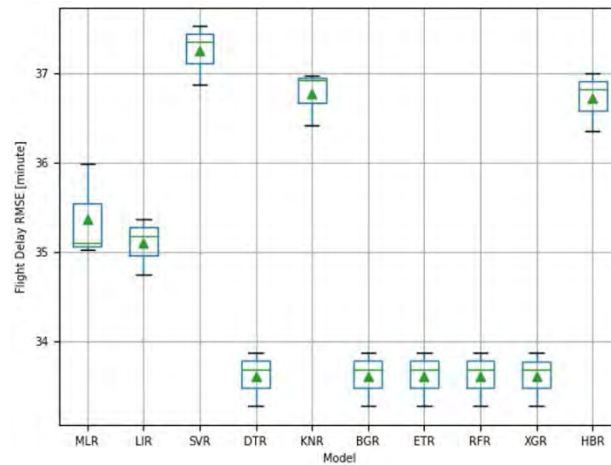


Figura 7. Comparativa RMSE de los 10 modelos cuando se usa escenario 3 del dataset, con 5 inputs: TRF, AEL, ORI, DES, NVU, y como output la demora a predecir DEM. Donde el mejor modelo RFR obtiene un error RMSE en la predicción de la demora del vuelo de 33,8 minutos

La razón de esa pérdida de precisión al eliminar esos 4 features: EAC, CDE, MDE, OBS, radica en que hay otras variables que influyen en la demora y que no están incluidas en el dataset como pueden ser el tipo de aeronave (principalmente su tamaño), nivel de congestión del aeropuerto, condiciones meteorológicas, condiciones ATM, etc. Cuando a este escenario 3 de solo esos 5 +1 features, se le aplica el método Permutation Importance para conocer la importancia (relativa) de los features, en la determinación del tiempo demora del vuelo, se obtiene el ranking de significancia, para el caso del (mejor) modelo RFR, que se muestra en la Figura 8.

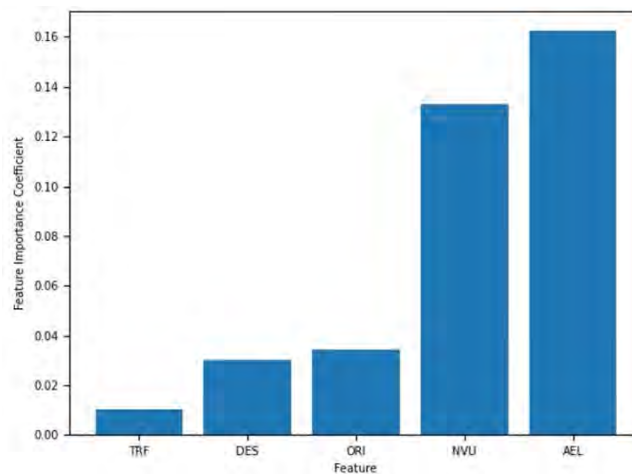


Figura 8. Orden de importancia de los 5 inputs features considerados en el escenario 3: TRF, DES, ORI, NVU, AEL, por orden creciente

El escenario 4 (análogamente al escenario 2) se genera al aplicar otra reducción más de features al escenario 3, en este caso para quedarse con los 3 mejores que autoseleccionan los modelos al aplicar el método Permutation Importance. En la Figura 9 se observa la comparativa del RMSE para los 10 modelos ML/DL, escenario 4 de 4 features, 3 input: ORI, NVU, AEL, y 1 output DEM. Los resultados muestran que a pesar de la reducción de features (a solo los 3 más importantes) se obtienen los mismos resultados que en el escenario 3 cuando se usan 5 features de entrada. Lo que muestra que las auto-reducciones de features realizadas por el método Permutation Importance han sido realizadas correctamente y lo que es más importante el dataset puede ser reducido o simplificado notablemente, consiguiendo con ello ahorro de tiempo de entrenamiento de los modelos, sin merma alguna en la precisión de la predictibilidad del tiempo de demora DEM.

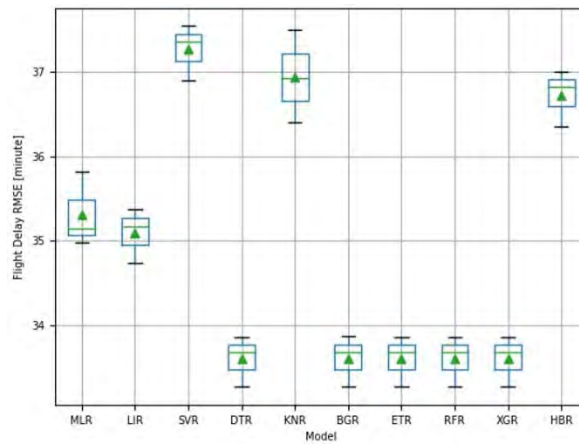


Figura 9. Comparativa RMSE de modelos para el escenario 4, con 3 inputs: ORI, NVU, AEL, y DEM como demora a predecir. Donde el mejor modelo RFR obtiene el mismo error RMSE de la predicción de la demora del vuelo de 33,8 minutos que el del escenario 3

Como cálculos auxiliares previos se aplicaron 14 tests estadísticos para caracterizar la distribución del feature tiempo de demora de vuelo DEM, que es la única variable numérica, dado que el resto de atributos de vuelo del dataset son variables categóricas: TRF, AEL, ORI, DES, NVU, CDE, MDE, OBS y EAC. Los resultados de estos test se muestran en la Tabla 2, donde se observa que el test ADFuller señala que el tiempo de demora de la salida (despegue) del vuelo es una variable estacionaria. El resto de hallazgos de la distribución del tiempo de demora es que no es una distribución Gaussiana, motivo por el cual se transformó dicha distribución en una distribución estándar (de media 0 y desviación típica 1), para facilitar el aprendizaje de los modelos ML/DL.

Tabla 2. Resultados de aplicar 14 test estadísticos a la distribución del feature demora del vuelo DEM

Test estadístico	Demora del vuelo
Shapiro-Wilk, si la variable es Gaussiana	Falso
D'Agostino K ² , si la variable es Gaussiana	Falso
Anderson-Darling, si la variable es Gaussiana	Falso
Linear Pearson, si la variable es independiente del output	Falso
Spearman Rank, si la variable es independiente del output	Falso
Kendall Rank, si la variable es independiente del output	Falso
Chi-square Cat., si la variable es independiente del output	Falso
ADfuller, si la variable es no estacionaria	Falso
Student's t-test, distribución igual al output	Verdadero
Paired Student's t-test, distribución igual al output	Verdadero
Anova, distribución igual al output	Verdadero
Mann-Whitney U, distribución igual al output	Verdadero
Kruskal-Wallis H, distribución igual al output	Verdadero
Friedman, distribución igual al output	Verdadero

En la Figura 10 se muestra la distribución del tiempo de demora del vuelo DEM en términos de mínimo (-15 minutos) y máximo (240 minutos), con los cuantiles 25% y 75% y de media (15 minutos).

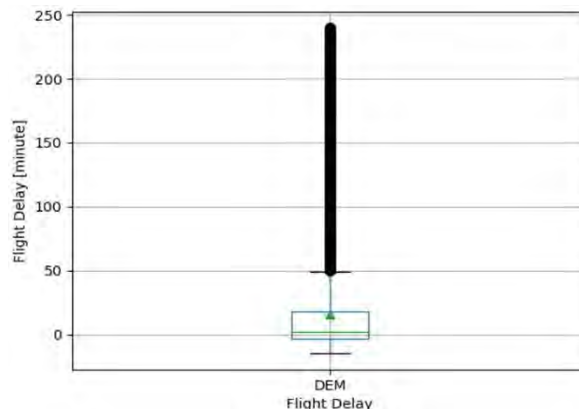


Figura 10. Distribución del tiempo de la demora de la salida del vuelo

En la Figura 11 se muestra que la función de distribución continua (designada como Density en dicha figura) del tiempo de demora del vuelo es unimodal. Estando la media de la distribución en los 15 minutos.

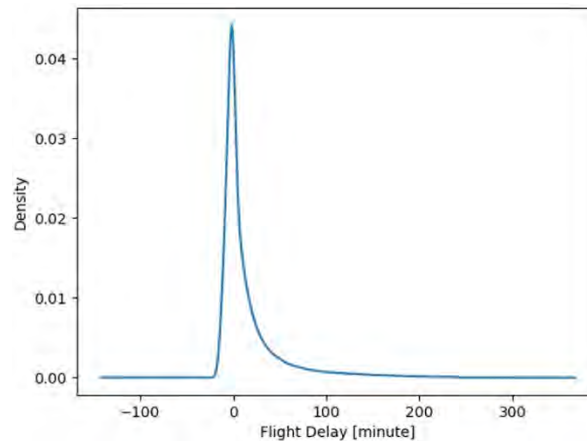


Figura 11. Función de distribución (densidad) unimodal de la demora (en la salida) de vuelo

En resumen, se puede afirmar, que con los atributos proporcionados para el entreno por el dataset considerado, las predicciones del tiempo de demora realizadas por los modelos ML/DL son muy aceptables, donde el error se mueve entre 16 y 33 minutos dependiendo del escenario considerado, lo que supone unas prestaciones aceptables y muy similares a las obtenidas en las investigaciones relacionadas que presentan una alta precisión en las previsiones [36, 37, 77-79].

4. CONCLUSIONES

Como lo muestran los habituales y periódicos informes de las principales organizaciones de la aviación civil internacional, IATA, ACI, ICAO, etc., la demanda de transporte aéreo presenta un continuo y relevante crecimiento desde hace casi tres décadas. Las autoridades aeroportuarias en todo el mundo intentan dar respuesta a dicha demanda con ampliación de las infraestructuras aéreas, construcción de nuevos aeropuertos, optimización en el uso de la capacidad existe, mejoras en los procedimientos ATM, etc.

Pero así y todo muchos aeropuertos (principalmente los grandes e internacionales) siguen presentando una situación de congestión (muchas veces severa en ciertos periodos del día) lo que conduce irremediablemente a la generación de demoras, situación que se complica aún más con situación de meteorología adversa. Por lo tanto, la predicción, lo más precisa posible, de las demoras se ha vuelto indispensable, ya que contribuye a formular estrategias (uso eficiente de la capacidad, mejor gestión de las operaciones, optimización de procedimientos ATM, etc.) para mitigar la generación y proliferación de las mismas (y evitar su propagación a otros aeropuertos de la red).

Entonces, la presente investigación propone un análisis comparativo de las prestaciones (medida en RMSE) en la predicción de la demora (en la salida de un vuelo) de 10 modelos ML/DL bajo diferentes escenarios configurados a partir de los atributos conocidos de cada vuelo. Los modelos son del tipo ML, pero en sus variantes más avanzadas (combinatoria de modelos) como son las técnicas de Ensemble en sus diferentes metodologías como algoritmos Voting, Bagging (segmentando el dataset para obtener las ventajas de entrenar cada modelo con diferentes subconjuntos), Stacking (usando salidas de unos modelos para entrenar otros) y Boosting (penalizando específicamente los errores no deseados). Todas estas estrategias sirven para compensar los errores de cada modelo de manera que el conjunto o Ensemble de los modelos sirvan para generalizar mejor.

También se ha incluido en la comparativa el modelo MLP de DL (sin que resulte el modelo ganador por no estar ajustado en sus parámetros de diseño e hiperparámetros). Los resultados comparativos de RMSE para los tiempos transformados son del orden de 0,45 y de 0,96 (para el modelo ganador RFR) según que features o escenarios se consideren en el entreno, lo cual se traduce en errores (aceptables) de entre 16 y 33 minutos de predicción en el tiempo de la demora de las salidas (despegues) de los vuelos.

Por otro lado, en este trabajo se implementa el método Permutation Importance que permite auto-ordenar los inputs features por su importancia en la determinación de la demora por parte de cada modelo. Dicha selección de features es evaluada de nuevo para las versiones reducidas de los features realizadas por los propios modelos ML/DL. Verificándose que dichas auto-reducciones no afectan a la precisión RMSE de la previsión de la demora, y además permiten reducir y aligerar el tamaño del dataset.

Aunque para el caso de estudio aquí utilizado se dispone de una extensa base de datos de salidas de vuelos, de un año completo, de toda la red aeroportuaria nacional y con muchos atributos (vinculados ellos a cada vuelo), existen limitaciones, es decir, falta de ciertos datos (p.e. condición meteorológica, tamaño de la aeronave, nivel de congestión del aeropuerto, condición ATM, capacidad del sistema de pistas, tiempo de rotación de la aeronave (*aircraft turnaround time*), etc.,) que podrían mejorar la predicción de la demora.

Por ello, una línea de investigación que se propone seguir, sería aumentar el número de features relevantes (aunque esto suele representar un desafío importante, debido a que no siempre se dispone de tanta información precisa en un determinado aeropuerto o sistema aeroportuario) para poder validar un mejor aprendizaje por parte de los modelos y por lo tanto obtener una mayor precisión en la predicción del tiempo de la demora. Y de otro lado, se podría profundizar en la investigación que afine los modelos de mayor potencial de aprendizaje como son los del tipo DL implementado aquí con el modelo MLP, en sus arquitecturas de capas, número y conexiones entre neuronas.

REFERENCIAS

- [1] ICAO. (2019). Presentation of 2019 Air Transport Statistical Results. ICAO.
- [2] IATA. (2021). World Air Transport Statistics. IATA.
- [3] Graham A. y Morrell P. (2017). Airport finance and investment in the global economy. Routledge.
- [4] de Neufville R. y Odoni A. (2013). Airport Systems, Planning, Design, and Management. McGraw-Hill.
- [5] Horonjeff R. et al. (2010). Planning and Design of Airports. McGraw-Hill.
- [6] Ashford N. et al. (2011). Airport Engineering. John Wiley.
- [7] ACRP. (2014). Defining and measuring aircraft delay and airport capacity thresholds. ACRP Report 104. Transportation Research Board.
- [8] Gelhausen M. et al. (2020). Airport capacity constraints and strategies for mitigation. Academic Press.
- [9] Janic M. (2009). Airport analysis, planning and design: Demand, capacity and congestion. Nova Science.
- [10] Kearns S. (2018). Fundamentals of International Aviation. Routledge.
- [11] Budd L. y Ison S. (2017). Air Transport Management. Routledge.
- [12] Borsky S. y Unterberger C. (2019). Bad weather and flight delays: The impact of sudden and slow onset weather events. *Economics of Transportation* 18, 10–26.
- [13] Choi S. et al. (2016). Prediction of weather-induced airline delays based on machine learning algorithms. En *IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference Proceeding*.
- [14] Fernandes N. et al. (2020). Factors influencing charter flight departure delay. *Research in Transportation Business & Management* 34, 100413.
- [15] ACI. (2012). Guide to Airport Performance Measures. ACI World.
- [16] Carvalho L. et al. (2021). On the relevance of data science for flight delay research: a systematic review. *Transport Reviews* 41(4), 499–528.
- [17] FAA. (2021). Definitions of variables. Federal Aviation Administration.
- [18] Eurocontrol. (2020). Performance Review Report. Eurocontrol.
- [19] OAG. (2017). OAG Punctuality League. OAG Aviation Worldwide.
- [20] Pamplona D. y Alves C. (2020). An overview of air delay: A case study of the Brazilian scenario. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 7, 100189.
- [21] ICAO. (2018). Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ATFM). Doc 9971. ICAO.
- [22] European Observatory on Airport Capacity & Quality. (2015). Delays to air transport in Europe: Methods of measuring, reporting and analyzing. European Commission.
- [23] Eurocontrol. (2007). A matter of time: Air traffic delay in europe. Eurocontrol.
- [24] IATA. (2021b). Airport Handling Manual. IATA.
- [25] Kalliguddi A. y Leboulluec A. (2017). Predictive Modeling of Aircraft Flight Delay. *Universal Journal of Management* 5(10), 485-491.
- [26] University of Westminster. (2015). European airline delay cost reference values. University of Westminster.
- [27] Peterson E. et al. (2013). The economic cost of airline flight delay. *Journal of Transport Economics and Policy* 47(1), 107-121.

- [28] NEXTOR. (2010). Total delay impact study. National Center of Excellence for Aviation Operations Research.
- [29] Cook A. et al. (2009). The cost of delay to air transport in Europe - Quantification and management. En 13th Air Transport Research Society World Conference. Abu Dhabi.
- [30] BTS. (2021). Bureau of transportation statistic. U.S. Department of Transportation.
- [31] Eurocontrol. (2020b). CODA Digest. All-causes delay and cancellations to air transport in Europe. Eurocontrol.
- [32] FAA. (2020). Cost of delay estimates. FAA APO-100. Federal Aviation Administration.
- [33] IATA. (2013). Inefficiency in European Airspace. IATA.
- [34] Aerocivil. (2022). Recuperado: <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadistics-de-las-actividades-aeronauticas>
- [35] Sternberg A. et al. (2021). A review on flight felay prediction. Recuperado: arXiv:1703.06118v3
- [36] Kim M. y Bae J. (2021). Modeling the flight departure delay using survival analysis in South Korea. *Journal of Air Transport Management* 91, 101996.
- [37] Truong D. (2021). Using causal machine learning for predicting the risk of flight delays in air transportation. *Journal of Air Transport Management* 91, 101993.
- [38] Guo Z. et al. (2021). A novel hybrid method for flight departure delay prediction using Random Forest Regression and Maximal Information Coefficient. *Aerospace Science and Technology* 116, 106822.
- [39] Lambelho M. et al. (2020). Assessing strategic flight schedules at an airport using machine learning-based flight delay and cancellation predictions. *Journal of Air Transport Management* 82, 101737.
- [40] Altmann A. et al. (2010). Permutation importance: a corrected feature importance measure. *Bioinformatics* 26(10), 1340-1347.
- [41] Breiman L. (2001). Random forests. *Machine Learning* 45, 5-32.
- [42] Guss W. y Salakhutdinov R. (2019). On universal approximation by neural networks with uniform guarantees on approximation of infinite dimensional maps. Recuperado: arXiv:1910.01545v1.
- [43] Vang R. (2020). *Multilayer Perceptrons: Theory and Applications*. Nova Science Publication.
- [44] Agarap A. (2019). Deep Learning using Rectified Linear Units (ReLU). Recuperado: arXiv:1803.08375v2.
- [45] Arora R. et al. (2018). Understanding deep neural networks with rectified linear units. Recuperado: arXiv:1611.01491v6.
- [46] Hara K. et al. (2015). Analysis of function of rectified linear unit used in deep learning. En *International Joint Conference on Neural Networks*.
- [47] Arora S. y Barak B. (2009). *Computational complexity: A modern approach*. Cambridge University Press.
- [48] Bao Y. et al. (2012). Forecasting air passenger traffic by support vector machines with ensemble empirical mode decomposition and slope-based method. *Discrete Dynamics in Nature and Society* 431512, 1-12.
- [49] Schonlau M. y Zou R. (2020). The random forest algorithm for statistical learning. *The Stata Journal* 20(1), 3-29.
- [50] Montgomery D. et al. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley.
- [51] Rokach L. (2019). *Ensemble Learning: Pattern classification using ensemble methods*. World Scientific Publishing.
- [52] Ganjisaffar Y. et al. (2011). Bagging gradient-boosted trees for high precision, low variance ranking models. En *SIGIR'11*. Beijing, China.
- [53] Friedman J. (2000). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics* 29, 1189-1232.
- [54] Hanif I. (2019). Implementing Extreme Gradient Boosting (XGBoost) Classifier to Improve Customer Churn Prediction. EN *ICSA 2019*. Bogor, Indonesia.
- [55] Chen T. y Guestrin C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. En *KDD'16*. San Francisco, USA.
- [56] Wang L. et al. (2022). A new principle for tuning-free Huber Regression. *Statistica Sinica* 32, 1-25.
- [57] Sun Q. et al. (2018). Adaptive Huber Regression. Recuperado: arXiv:1706.06991v2.
- [58] Camana M. et al. (2020). Extremely randomized trees-based scheme for stealthy cyber-attack detection in smart grid networks. *IEEE* 20, 19921-19933.
- [59] Geurts P. et al. (2006). Extremely randomized trees. *Mach Learn* 63, 3-42.
- [60] Izza Y. et al. (2020). On explaining Decision Trees. Recuperado: arXiv:2010.11034v1.
- [61] Azadkia M. (2020). Optimal choice of k for k-nearest neighbor regression. Recuperado: arXiv:1909.05495v4.
- [62] Goodfellow I. et al. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
- [63] Chen S. et al. (2012). Improving the forecasting accuracy of air passenger and air cargo demand: The application of back-propagation neural networks. *Transportation Planning and Technology* 35(3), 373-392.
- [64] Kuo S. y Chen S. (2010). Air passenger and air cargo demand forecasting: Applying artificial neural networks to evaluating input variables. En *12th WCTR*. Lisbon, Portugal.
- [65] Liu Y. et al. (2020). An improved analysis of stochastic gradient descent with momentum. En *34th Conference on Neural Information Processing Systems*. Vancouver, Canada.
- [66] Gower R. et al. (2019). SGD: General Analysis and Improved Rates. Recuperado: arXiv:1901.09401v4.
- [67] Rajkumar A. y Agarwal S. (2012). A differentially private stochastic gradient descent algorithm for multiparty classification. En *15th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. La Palma, Spain.
- [68] Dingari M. et al. (2019). Air Traffic Forecasting Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Scientific & Technology Research* 8(10), 556-559.

- [69] Hastie T. et al. (2013). The elements of statistical learning. Data mining, inference, and prediction. Springer.
- [70] Kingma D. y Ba J. (2014). Adam: A Method for Stochastic Optimization. Recuperado: arXiv:1412.6980.
- [71] Aggarwal C. (2018). Neural Networks and Deep Learning. Springer.
- [72] Hassoun M. (1995). Fundamentals of Artificial Neural Networks. MIT Press.
- [73] Jiang X. et al. (2017). Forest pruning based on branch importance. Computational intelligence and neuroscience Article 3162571.
- [74] Kulkarni V. y Sinha P. (2012). Pruning of Random Forest classifiers: A survey and future directions. En International Conference on Data Science & Engineering.
- [75] Pedrycz W. y Chen S. (2020). Deep Learning: Concepts and Architectures. Springer.
- [76] Chang C. y Lin C. (2011). LIBSVM: A library for support vector machines. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology 2(3), 1-27.
- [77] Rousseeuw P. y van Driessen K. (1999). Elliptic Envelope. A fast algorithm for the minimum covariance determinant estimator. Technometrics 41(3), 212-223.
- [78] Henriques R. y Feiteira I. (2018). Predictive Modelling: Flight delays and associated factors, hartsfield-Jackson Atlanta International Airport. Procedia Computer Science 138, 638-645.
- [79] Belcastro L. et al. (2016). Using scalable data mining for predicting flight delays. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology 8(1), Article 5.

Pronóstico de la demanda de transporte de carga aérea. Caso de estudio Colombia

Juan Gerardo Muros Anguita¹

Oscar Díaz Olariaga²

¹ *Universidad de Granada*
España

² *Universidad Santo Tomás*
Colombia

La planificación aeroportuaria depende en gran medida de los niveles de actividad que se prevén para el futuro y, para planificar las instalaciones e infraestructuras de un sistema aeroportuario y poder satisfacer las necesidades futuras, es esencial predecir el nivel y la distribución de la demanda, tanto de pasajeros como de carga aérea. Para este trabajo se realizó un pronóstico, a corto plazo (5 años), de la demanda de transporte de carga aérea, aplicado a un caso de estudio concreto (Colombia), teniendo en cuenta el periodo pandémico más severo (2020). Para realizar el pronóstico se presenta un planteamiento basado en métodos de Machine Learning/ Deep Learning ML/DL de redes neuronales convolucionales, que permiten análisis no lineales espacio-temporales, como los espacios de multivariantes y de multisteps temporales. Estas técnicas presentan ventajas frente a los métodos clásicos estadísticos, ya que los métodos estadísticos solo permiten análisis lineales y limitados en sus predicciones temporales. El análisis desarrollado establece la longitud óptima del periodo de predicción; por otro lado, la metodología propuesta permite identificar las variables socioeconómicas más relevantes en la predicción de la demanda de carga aérea, a partir del análisis variacional de diferentes combinaciones de las variables. Los resultados muestran que la demanda de carga aérea internacional es fuertemente dependiente del GDP y el PCG (Per Cápita GDP), mientras que la demanda de carga aérea doméstica depende significativamente del PCG. Los resultados muestran, para el país-caso de estudio, una muy rápida recuperación de la demanda de carga aérea a índices de la pre pandemia, comportamiento ya encontrado en otros estudios e investigaciones.

¹ Ingeniero Aeronáutico.

Contacto: e.juangerardo@go.ugr.es

² Doctor en Ingeniería Aeronáutica.

Contacto: oscardiazolariaga@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los planes para el desarrollo de los distintos componentes del sistema aeroportuario dependen en gran medida de los niveles de actividad que se prevén para el futuro. Para planificar las instalaciones e infraestructuras de un aeropuerto, o sistema/conjunto de aeropuertos, y poder satisfacer las necesidades futuras, es esencial predecir el nivel y la distribución de la demanda en los diversos componentes del sistema aeroportuario [1]. Pronosticar la demanda en una industria tan dinámica y sensible a factores exógenos como lo es la aviación es una tarea extremadamente difícil. No obstante, es necesario realizar estimaciones de tráfico aéreo como paso previo a la planificación y diseño de las instalaciones aeroportuarias, ya sea de un aeropuerto o de una red aeroportuaria [2, 3].

La comprensión de los patrones de demanda futuros permite al planificador aeroportuario evaluar el desempeño futuro del aeropuerto y con ello recomendar programas de desarrollo consistentes para estimar los costos asociados con estos planes de desarrollo y para proyectar las fuentes y el nivel de ingresos para respaldar las inversiones de capital a realizar [4]. El pronóstico de la demanda es un requisito básico para desarrollar un plan maestro de aeropuerto o un plan de sistema aeroportuario a nivel regional o nacional [5-7].

Para evaluar las características de la demanda futura, es necesario el desarrollo de predicciones fiables de la actividad aeroportuaria. Existen numerosos factores que afectarán la demanda, por ello, los planificadores que desarrollan pronósticos de demanda deben contemplar, además de los datos históricos aeronáuticos (tráfico aéreo), datos socioeconómicos locales, como riqueza nacional, poder adquisitivo de los habitantes, demografía (población), producción industrial, índice de precios al consumidor, tasa de cambio, etc., ya que estos indicadores tienen una gran influencia en el comportamiento de la demanda de tráfico aéreo [2, 8, 9].

Sobre el periodo temporal a pronosticar, la experiencia práctica demuestra que los pronósticos de tráfico aéreo no suelen ser precisos cuando las previsiones se realizan a largo (15-20 años) o muy largo plazo (25-30 años), pero inexorablemente las previsiones a corto y medio plazo (entre 5 y 10 años) (generalmente más precisas) son importantes para el planificador o tomador de decisión, ya que comprenden un periodo habitual de planificación aeroportuaria [10-12].

En lo que se refiere al objetivo principal de la presente investigación, la demanda de transporte de carga aérea ha venido experimentando un ininterrumpido crecimiento en los últimos 35 años. Más precisamente, en las últimas dos décadas (hasta el año 2019), y a nivel mundial, el promedio anual de la tasa de crecimiento del indicador Freight Tonne-Kilometer (FTK) fue del 4,1%, mientras que el del Mail Tonne-Kilometer MTK fue del 4,05 %; en el año 2019 el FTK fue de 225×10^9 , y el Revenue Tonne-Kilometer RTK fue de 1043×10^9 [13-15]. La pandemia del Covid-19 produjo una caída del FTK en 2020, a nivel mundial, del 18,5% con respecto a 2019 [15, 16]. Asimismo, varios estudios están pronosticando que la demanda de carga aérea (a nivel global), se recuperará, a índices de crecimiento pre pandémicos, a muy corto plazo, incluso antes que la demanda de pasajeros aéreos [17-19].

En otro orden, en lo que concierne a las metodologías utilizadas para la realización de pronósticos, los académicos vienen presentando estudios e investigaciones formales desde hace aproximadamente tres décadas. En este tiempo se han desarrollado una diversidad de modelos para pronosticar la demanda de pasajeros, muchos de los métodos de predicción más utilizados se pueden aunar en dos grandes grupos: modelos económicos y modelos de series temporales [20]. Ahora bien, debido a la característica no lineal de la demanda del transporte aéreo, los enfoques económicos y de series temporales se critican severamente debido a su capacidad de pronóstico efectiva muy limitada y pobre [21].

Por ello algunos académicos intentan explorar otras metodologías para el pronóstico, como Dynamic Linear Models DLM [8] o Dinámica de Sistemas [22-24]. Pero lo que cada vez más los académicos están utilizando en sus planteamientos son metodologías basadas en redes neuronales artificiales ANN. Varias características distintivas de las ANN las hacen relevantes para un cálculo de pronóstico [25-27]:

1. A diferencia de los métodos tradicionales las ANN son métodos auto adaptativos basados en datos en el sentido de que existen pocas suposiciones a priori sobre los modelos para los problemas en estudio. Aprenden de los ejemplos y capturan relaciones funcionales sutiles entre los datos, incluso si las relaciones subyacentes son desconocidas o difíciles de describir. Por tanto, las ANN son adecuadas para problemas cuyas soluciones requieren conocimientos que es difícil de especificar, pero para los que hay suficientes datos u observaciones.
2. Las ANN pueden generalizar, es decir, después de conocer los datos que se les presentan, las ANN a menudo pueden inferir correctamente la parte invisible de una población, incluso si los datos de la muestra contienen información ruidosa.
3. Las ANN son aproximadores funcionales universales, se ha demostrado que una red puede aproximar cualquier función continua con cualquier precisión deseada. Las ANN tienen formas funcionales más generales y flexibles (que las que poseen los métodos estadísticos tradicionales) que pueden manejar eficazmente.
4. Las ANN no son lineales, la predicción ha sido durante mucho tiempo el dominio de las estadísticas lineales. Los enfoques tradicionales de la predicción de series de tiempo, como el método de Box-Jenkins o ARIMA, asumen que las series de tiempo en estudio se generan a partir de procesos lineales.

Pero no es razonable suponer, a priori, que una realización particular de una serie de tiempo determinada se genera mediante un proceso lineal. Por ello, las redes neuronales artificiales, que son enfoques basados en datos no lineales, son capaces de realizar modelos no lineales sin conocimiento previo sobre las relaciones entre las variables de entrada y salida. Por lo tanto, se puede afirmar que las ANN son una herramienta de modelado más general y flexible para el pronóstico [26-30].

Entonces, el objetivo de la presente investigación es realizar un pronóstico a corto plazo de la demanda de carga aérea, para el cual se ha utilizado como caso de aplicación el mercado aéreo de Colombia, actualmente el tercer mercado aéreo del sub continente latinoamericano, y quinto de las Américas, por volumen de tráfico gestionado [31, 15], con la especial particularidad de incluir en el análisis los datos de demanda de 2020, el cual se ha visto severamente afectado por la pandemia del Covid-19, y estimar entonces, como resultado complementario (pero de gran interés), una fecha aproximada de recuperación tanto del volumen de la demanda como la tendencia de crecimiento de la misma al periodo pre pandémico.

Para conseguir tal objetivo, y como herramienta de cálculo, se desarrolla un modelo derivado de las redes neuronales artificiales del tipo ConvLSTM2D (<Conv> de Convolutacional y <LSTM2D> de memoria a corto-largo plazo); este tipo de arquitectura es un híbrido entre las redes convolucionales neuronales CNN, muy útiles para la extracción de patrones invariantes en su posición espacial, y las redes neuronales recurrentes RNN, muy apropiadas para la extracción de patrones dentro de su contexto temporal [32-36].

Estas técnicas de predicción, basadas en Machine Learning/Deep Learning ML/DL, pueden incorporar más elementos de análisis y por tanto ser potencialmente más eficaces [37]. Otras de las ventajas de las redes ConvLSTM2D, con respecto a los métodos clásicos basados en auto regresión, es que admiten un tratamiento multivariable (varios features de entrada) y análisis no lineales [38, 39]. Indicar que en la aplicación al caso de estudio de la presente investigación, este tipo de modelo neuronal ML/DL ConvLSTM2D, viene a representar el modelo de conocimiento abstracto, inferido del aprendizaje de los patrones históricos de las series temporales de tráfico aéreo, con el cual predecir la evolución futura de dichas series.

2. CASO DE ESTUDIO

Los datos para el desarrollo de la presente investigación se obtienen del país-caso de aplicación (o de estudio) Colombia, actualmente el tercer mercado aéreo del sub continente latinoamericano, y quinto de las Américas, por volumen de tráfico gestionado [15, 31]. En Colombia se liberalizó la industria del transporte aéreo / aviación a principios de la década de 1990. Esto trajo consigo reformas estructurales

tanto en el sector aeroportuario (que condujo a la privatización de los principales aeropuertos de la red [40]) como en el de las líneas aéreas, todo ello a través de una ininterrumpida batería de políticas públicas (aún hoy vigentes) que incluye no solo aspectos normativos y regulatorios sino también agresivos programas de inversión pública y privada en infraestructura y tecnología [41], y donde, por otro lado, las tarifas aéreas se liberalizaron totalmente desde el año 2012 [42].

Como resultado de todas estas políticas públicas aéreas, desde el inicio de la liberalización de la industria (1991) y hasta el año 2019, el transporte de pasajeros (totales) creció casi un 800% (liderado por el transporte de pasajeros domésticos), mientras que la demanda de carga aérea (total) en el mismo periodo creció casi un 200% (liderado por el transporte de carga aérea internacional) [43]. En términos de infraestructuras, hay que mencionar que la red aeroportuaria colombiana está compuesta por 58 aeropuertos abiertos al tráfico comercial (de pasajeros y mercancías).

En el ámbito económico, destacar que el crecimiento del PIB del país-caso de estudio, en el periodo 1979-2020, fue del 850% [44]; se cree oportuno aportar este dato ya que varias investigaciones han identificado una estrecha y directa relación entre la demanda del transporte de carga aérea y la evolución del PIB en el país o región de estudio [45, 46, 47, 48, 49, 50].

En relación con el impacto de la pandemia del Covid-19 en el país-caso de estudio, dicha circunstancia generó, en el peor año de la pandemia, 2020, una estrepitosa caída de la demanda de pasajeros aéreos (85% en pasajeros domésticos, 75% en pasajeros internacionales, ambos con respecto a 2019); sin embargo, la demanda de carga aérea (total) solo cayó un 16% con respecto al 2019, concepto donde el impacto de la pandemia fue mucho menor [51].

Entonces, y para el periodo de estudio 1979-2020 (ambos inclusive), los datos históricos de la demanda de carga aérea (doméstica e internacional) se obtienen del sistema estadístico de la Autoridad Aeronáutica de Colombia [43], y las series históricas de los indicadores socioeconómicos (nueve en total) de las instituciones oficiales relacionadas del país [44, 52], ambos conjuntos de datos son de carácter público y de acceso libre (sin costo).

3. MÉTODO

Las técnicas de redes neuronales convolucionales para analizar el espectro espacial de una imagen vienen siendo abordadas con bastante éxito en el campo de la visión artificial desde hace pocos años con los modernos métodos de Machine Learning/Deep Learning, integrándose en modelos híbridos junto a las redes neuronales recurrentes tipo LSTM para analizar el espectro temporal de imágenes [54, 55]. En la presente investigación la novedad reside en aplicar dichas redes híbridas ConvLSTM2D para extraer los patrones de comportamiento tanto de las series temporales de la variable carga aérea (usando redes recurrentes tipo LSTM-Long Short Term Memory) como de las variables socioeconómicas históricas (patrones de correlación que se extraen usando redes neuronales convolucionales).

Métodos estadísticos como ARIMA han venido proporcionando éxitos aceptables en los problemas de pronóstico temporal de una variable, pero estos métodos clásicos se muestran limitados, en cuanto que solo pueden realizar análisis lineales y uni-variable, lo que no permite poder recoger de forma correcta los acoplamientos existentes con las otras variables del pronóstico multi-variable, así como tampoco poder recoger efectos no lineales, como son los que se presentan con la aparición de ciclos y sub-ciclos dentro de la tendencia general de las variables [8].

En este estudio, se parte de un dataset compuesto por once features (dos aeronáuticos y nueve socioeconómicos) descritos en series temporales desde el año 1979 al año 2020 (ambos inclusive). Estas once variables se mencionan en la Tabla 1. Las variables no solo recogen la propia evolución de la demanda de la carga aérea nacional DOM y de la carga aérea internacional INT, sino que también vienen acompañadas de nueve variables socioeconómicas del país-caso de estudio, que buscan proporcionar el contexto histórico para explicar las razones de la evolución de la demanda de transporte de carga aérea.

Estas variables de contexto se han elegido en función de su relevancia apriorística y de la disponibilidad estadística de las mismas. Se habla de “a priori” porque luego el método será el responsable de fijar la importancia de estas dentro del pronóstico de la demanda de carga aérea.

Tabla 1. Variables aeronáuticas y socioeconómicas del país-caso de estudio utilizadas en la investigación.

Acrónimo	Descripción	Unidad
GDP	Producto Interior Bruto	USD
PCG	PIB per cápita	USD
POP	Población	N/A
IPI	Índice de Producción Industrial	Valor adimensional
CPI	Índice de Precios al Consumidor	Valor adimensional
BMR	Tasa Representativa de Mercado (relación peso-USD)	COP (peso colombiano)
FDI	Inversión Extranjera Directa	USD
EXP	Exportaciones	USD
IMP	Importaciones	USD
DOM	Transporte carga aérea doméstica	Tonelada
INT	Transporte carga aérea internacional	Tonelada

El método Machine Learning/Deep Learning se ha implementado en un algoritmo propio escrito en Python y usando las librerías en abierto de Keras y Tensorflow, el cual consiste en el proceso que se describe a continuación.

1. *Paso 1.* (preparación de datos). Lo primero que se hace es normalizar los datos, es decir, escalar las variables en una misma escala entre 0 y 1 a fin de que todas ellas sean comparables como inputs por el modelo ConvLSTM2D. En la preparación de los datos se implementó una normalización posterior, consistente en asignarle el valor 0 al valor mínimo de cada variable y 1 al valor máximo. Y sobre esa nueva transformación se le aplicó una estandarización adicional, consistente en asignarle una distribución estándar a la serie, con media 0 y desviación típica 1. Con dichas transformaciones en las distribuciones de las series temporales se facilita el aprendizaje del modelo ConvLSTM2D. La elección de dichas transformaciones del dataset original forma parte de procesos heurísticos dentro de los espacios de búsqueda de transformaciones, con ensayo y medición de la métrica objetivo.
2. *Paso 2.* (separación del dataset en tensores de Inputs X y Outputs Y). Dado que el modelo ConvLSTM2D es del tipo supervisado [32-35], se precisa separar el dataset histórico en tensores de 5 dimensiones para los inputs X y de 3 dimensiones para las salidas buscadas Y , donde las dimensiones vienen fijadas por la arquitectura del modelo. El objetivo del modelo es mapear o buscar una función $f_{model\ forecast}$ (donde \hat{Y} se denota con sombrero para indicar que es un pronóstico o estimación de la variable j) a partir de unas variables de entrada (X inputs), como se muestra en la ecuación (1).

$$\hat{Y}_{j,t+n_outs}, \hat{Y}_{j,t+n_outs-1}, \dots, \hat{Y}_{j,t} = f_{model\ forecast}(x_{i,t-1}, x_{i,t-2}, \dots, x_{i,t-n_lags}) \quad (1)$$

En la ecuación (1) el subíndice j de \hat{y} denota la variable de salida considerada, en este trabajo podrá tomar los valores DOM o INT que corresponden respectivamente a las demandas de carga aérea doméstica e internacional, pero no las dos a la vez, ya que se ha considerado un escenario de predicción de una única variable de salida por simplicidad, aunque considerando múltiples variables de entrada X_i (multi-variable). El subíndice $t+n_outs$ indica los pasos futuros de predicción del tiempo t considerado, por lo tanto, la predicción \hat{Y} consiste en un vector de n_outs componentes temporales.

La variable de entrada X comprende todas las variables de entrada consideradas en cada escenario, lo cual se denota con el subíndice i y para cada variable se usarán n_lags o pasos previos del tiempo t . En resumen, se predice n_outs pasos temporales posteriores a t de una única variable de salida a partir de los n_lags pasos previos al instante t de todas las variables de entrada consideradas en cada escenario, de manera que, aunque se recorren los 42 años históricos que van desde 1979 al 2020 se hacen con slots o secuencias de longitudes temporales fijas n_outs y n_lags para recoger los patrones de los ciclos temporales presentes dentro de las tendencias generales de las series temporales. Es por ello, que las secuencias de n_outs y n_lags se han parametrizado para poder variarlas, y siempre serán inferiores a la

longitud total de la serie histórica y pueden ser también diferentes entre sí. Por razones de simplificación, en este trabajo se escogerán iguales n_outs y n_lags y al parametrizar dichos valores de secuencias se estudiará cual es el valor de longitud óptima de predicción n_outs que proporciona el MAPE mínimo. La serie temporal histórica se inicia en el primer instante t igual al primer año que puede dejar por detrás n_lags años previos, e igualmente acaba en el instante t que puede dejar $t+n_outs$ años futuros, para que siempre se puedan formar las parejas X Input e Y Output necesarias para el aprendizaje supervisado.

Asimismo, los datos temporales se deben presentar como tensores X de 5D e Y de 3D dimensiones para adaptarlas a las capas de entrada y de salida del modelo ConvLSTM2D respectivamente [37]. Los datos X e Y se dividen a su vez en datos de entreno y de test, con los datos de entreno se entrenará el modelo y con los datos de test se medirá el MAPE obtenido en el entreno. En la presente investigación se ha elegido una tasa del 90% para los datos de entreno frente a un 10% para los de datos test, dada la escasez de datos históricos [32, 33].

3. *Paso 3.* (definición del modelo ConvLSTM2D). El modelo aquí utilizado de ML/DL es un modelo híbrido compuesto de un codificador de los patrones de datos mediante redes convolucionales CNN (Convolutional Neural Network) y redes recurrentes tipo LSTM para captar tanto los patrones de correlación o de contexto entre todas las series de variables como los de tiempo [53, 56, 57, 58, 59]. Las ecuaciones que describen las correlaciones de contexto entre las variables inputs son las descritas por [54] cuyo diagrama de extracción de características (features) se muestra en la Figura 1.

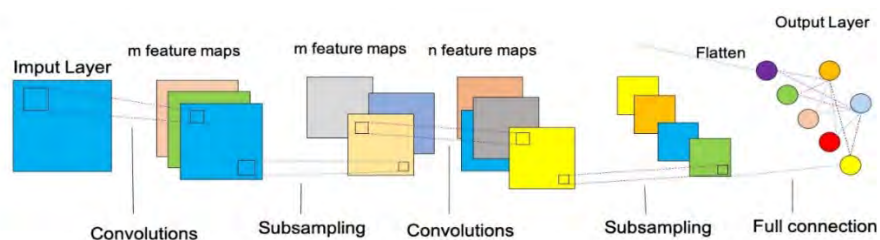


Figura 1. Esquema general producción de mapas de features realizados por capas convolucionales [54]

Por otro lado, las redes recurrentes LSTM se emplean para describir los contextos temporales de cada variable, donde sus ecuaciones son las descritas por Donahue et al. [60], y cuyo diagrama mostrando la recurrencia entre la memoria temporal a corto y largo plazo se muestra en la Figura 2.

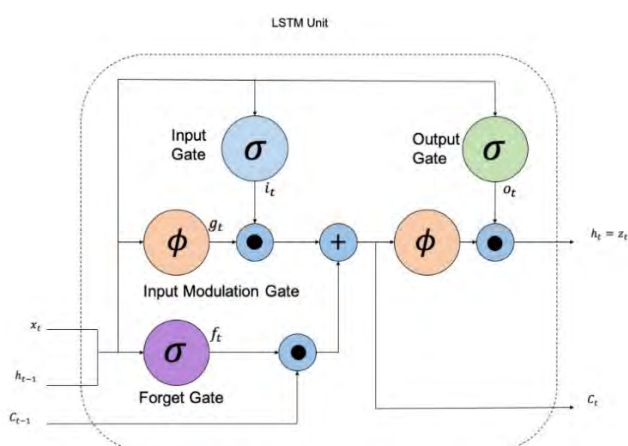


Figura 2. Esquema de una célula o unidad de memoria de corto-largo plazo LSTM [60]

En particular, en este trabajo el modelo ConvLSTM2D se ha implementado en un algoritmo escrito en Python usando las librerías de ML/DL en abierto de Tensorflow y Keras, parametrizando la arquitectura, configuración y cantidad de las capas presentes en el modelo ConvLSTM2D, por si se desea optimizar posteriormente dicho modelo; en este estudio se eligieron tres bloques de capas híbridas ConvLSTM2D.

La Figura 3 muestra la arquitectura completa y detallada del modelo ConvLSTM2D para el caso particular de una configuración de los hiper parámetros usando solo dos features de entrada con seis pasos de

tiempos previos de n_lags y seis pasos de tiempos predichos n_outs , con dos subsecuencias (o sub ciclos) y tres años por subsecuencia; en dicha figura se aprecian las referidas cinco dimensiones del tensor de entrada X correspondientes respectivamente al número de muestras, número de subsecuencias, una variable por columna, tres años por subsecuencia y dos features o inputs. Los pasos previos de tiempo n_lags son el producto del número de subsecuencias por los años de una subsecuencia. El tensor de salida Y , presenta solo tres dimensiones correspondientes respectivamente al número de muestras, los pasos temporales a predecir n_outs y 1 como cantidad de variables de salida.

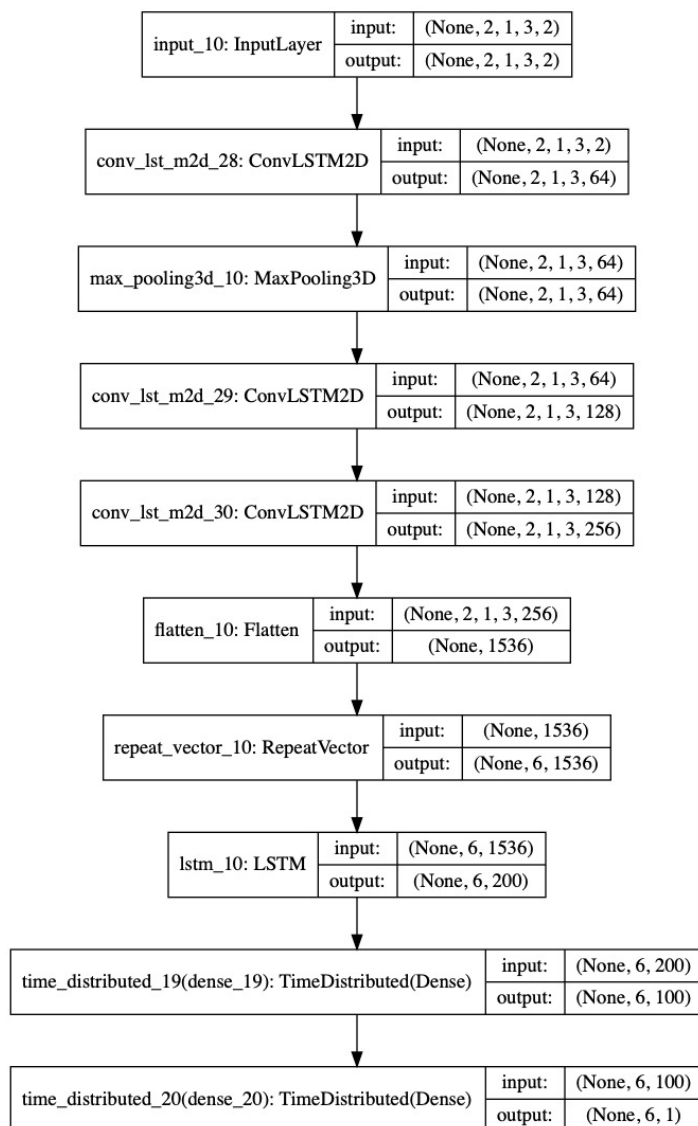


Figura 3. Arquitectura implementada en la investigación, consistente en tres bloques de capas ConLSTM2D

En la Figura 3 se observa que los inputs del tensor X 5D se conectan a la capa de entrada (input) a la que le sigue la capa ConvLSTM2D de 64 filtros convolucionales, seguida de una capa MaxPooling3D, que submuestra o regulariza la salida de la capa anterior, seguida luego de dos capas más de ConvLSTM2D con 128 y 256 filtros convolucionales respectivamente, a las cuales sigue una capa flatten que aplanar la salida multidimensional en dos dimensiones, y a esta le sigue el bloque decodificador LSTM, el cual precisa que le sean adaptadas a las tres dimensiones al incluir la dimensión n_outs lo que se realiza vía una capa previa RepeatVector.

Para finalizar, se incluyen dos capas Time Distributed (densas) que adaptan dichas salidas del decodificador LSTM a las 3D del tensor de salida Y [39]. Es importante observar, que al estar parametrizada la arquitectura del modelo ConvLSTM2D aquí implementado es posible realizar un estudio variacional para optimizar su arquitectura, cambiando los valores de configuración, cantidad y tipos de capas en dicho modelo.

4. *Paso 4* (compilación, entreno y evaluación del modelo). Una vez definido el modelo LSTM2D se procede a compilarlo definiendo la función de coste (a minimizar durante el entreno), las métricas con las que se mide el aprendizaje y el tipo de optimizador del gradiente. En particular, aquí se ha empleado MSE (Mean Square Error) como función de coste o de pérdidas, junto con las métricas RMSE (Root Mean Square Error) y MAPE (Mean Absolute Percentage Error), cuyas definiciones están recogidas respectivamente en las ecuaciones (2) a (4). En particular, la ecuación (2) define el error MSE donde n es el número de muestras para obtener la media muestral.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_x \|y(x) - \hat{y}(x)\|^2 \quad (2)$$

$$RMSE = (MSE)^{1/2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_x |y(x) - \hat{y}(x)| \quad (4)$$

El entrenamiento del modelo se reduce a introducir el tensor de entreno X_{input} en la primera capa de entrada al modelo ConvLSTM para a continuación ir recorriendo todas las capas hasta la capa de salida, lo que proporciona una estimación que se ha denotado como $\hat{Y}(x)$, con la cual comparar con el tensor de la salida esperada Y , lo que define la función de coste MSE, a partir de la cual y mediante el proceso de Backpropagation BP se actualizan los distintos pesos de las neuronas que conforman el modelo [61].

En resumen, el proceso BP calcula el gradiente (o derivada) del error total proporcionado por la función de coste al comparar la salida estimada con la salida objetivo respecto a todas las neuronas del modelo, capa a capa y aplicando la regla de la cadena de la derivación para calcular la dependencia o sensibilidad del error respecto a todas las neuronas de todas las capas, yendo de adelante hacia atrás, hasta llegar a la primera capa.

El proceso se repite introduciendo un nuevo lote de parejas de entreno X_{input} e Y_{output} para repetir dicho ciclo de estimación de salida, luego, se calcula la función de coste total, la cual reparte el error entre todas las neuronas aplicando el método de BP, con el que se actualizan los pesos de las neuronas, para a continuación proceder a cargar el nuevo lote. Cuando se acaban los lotes de parejas de entreno X_{input} e Y_{output} se repite el ciclo un número determinado de veces (en este trabajo se usaron 400 ciclos) o hasta que se obtenga un error relativo pequeño o un nivel de ajuste de pesos del modelo suficientemente preciso.

En las Figuras 4 y 5 se muestra el cambio del MSE durante las sucesivas iteraciones de entreno de todos los lotes, tanto para las parejas de entreno como la de test y tanto para la función de coste MSE como para la métrica RMSE respectivamente. Nótese que las muestras fueron normalizadas y estandarizadas por lo que sus valores no están referidos a la escala real de las muestras. Observar cómo cada vez que finaliza un ciclo o iteración de todos los lotes se calcula tanto el error de las muestras de entreno como las de test, de manera que se obtiene una métrica de validación espacio muestral de test que es independiente del espacio muestral de las parejas de entreno.

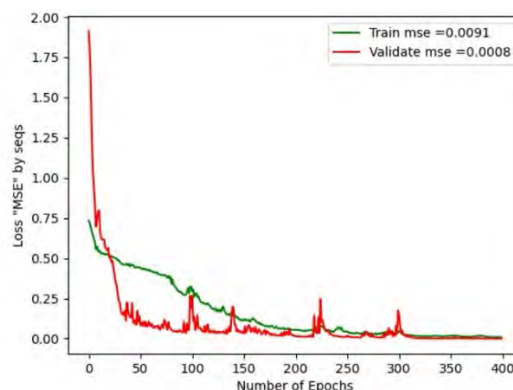


Figura 4. Evolución de la función de coste MSE durante el entreno o número de épocas (o ciclos) tanto para las muestras de entreno como las de test

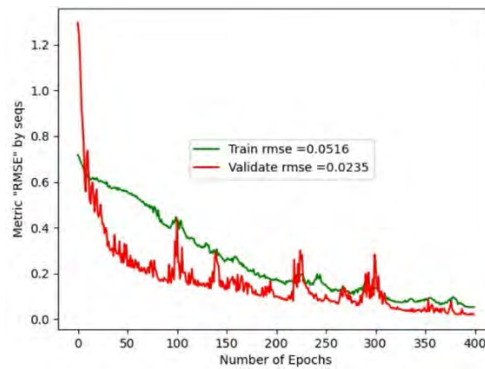


Figura 5. Evolución de la métrica RMSE durante el entreno o repetición de los ciclos tanto para las muestras de entreno como las de test

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con el objetivo de encontrar los valores óptimos en la extensión de años de la secuencia a predecir y de valorar los features más importantes que acompañan al mejor pronóstico de las variables carga aérea doméstica (DOM) y carga aérea internacional (INT), se realiza un estudio variacional de los parámetros del modelo a fin de elegir y pronosticar con el mejor escenario posible.

4.1 Predicción de la demanda de carga aérea internacional

El primer análisis variacional implementado consiste en buscar en el espacio de longitud de secuencias la correspondiente al número de años n_outs a predecir que sean las óptimas en el sentido de que proporcionen el menor MAPE de la variable carga aérea internacional INT, medido este MAPE en el último ciclo de n_outs de la serie histórica. Para simplificar el problema se ha elegido n_outs (años futuros pronosticados) igual a n_lags (años previos), y un escenario con solo dos inputs (GDP y el propio INT), pero se han parametrizado las subsecuencias anuales en las que se puede dividir cada secuencia de n_lags . La elección de los ciclos y subciclos en los que se divide la serie histórica es crítica para facilitar como el modelo extrae los patrones de comportamiento de la serie histórica INT.

Como el proceso de aprendizaje de los modelos ML/DL es estocástico, se ha repetido 10 veces el entreno de cada configuración paramétrica de los escenarios del modelo para ofrecer el resultado en términos de media y desviación típica del MAPE. En la Tabla 2 se muestran los resultados de los MAPE como función de los diferentes n_outs y del número de subsecuencias, a las cuales corresponde un número de años por subciclo. Hay que destacar que dichos valores MAPE están referidos a un dataset cuyos valores han sido escalados, normalizados y estandarizados y por tanto no se corresponden con la escala original.

Tabla 2. Análisis variacional para encontrar las longitudes óptimas de las secuencias y subsecuencias que dan el menor error MAPE en la predicción de la carga aérea internacional

n_lags years	$n_Subseqs$	subseq years	mean MAPE	std MAPE	Ranking
12	4	3	90,47	30,28	6to mejor
12	3	4	83,79	47,08	4to mejor
10	2	5	102,33	38,64	7mo mejor
8	2	4	87,15	53,91	5to mejor
6	3	2	14,87	4,66	2do mejor
6	2	3	8,35	2,51	el mejor
4	2	3	16,49	21,36	3ro mejor

Un primer resultado a destacar (mostrado en la Tabla 2), es que el número de n_outs más óptimo, que es igual al de n_lags , es de 6 años, los cuales se toman en 2 subsecuencias de 3 años cada una. Este escenario mejora levemente al de 6 años cuando se toman 3 subsecuencias de 2 años cada una, lo que muestra la importancia de la elección de este parámetro de longitud de la subsecuencia o subciclo. La explicación de por qué resulta el MAPE mayor cuando se toman menos años, p.e. 4 años y 2 subciclos de 2 años cada uno, se encuentra en que los modelos ML/DL al predecir al mismo tiempo una determinada cantidad de años futuros, a partir de los patrones encontrados en los ciclos (n_lags) y sus subciclos previos, estas longitudes

menores no son capaces de recoger fielmente la información que aparece cuando se toman ciclos de 6 años con 2 subciclos de 3 años cada uno. Finalmente, cuando estos ciclos son de mayor longitud como 8 o 12 años, los errores son mayores, también influenciados por la mayor cantidad de años a predecir. Este comportamiento recogido en la información que contienen los tensores de 5D de los inputs X y de 3D en las salidas Y es un comportamiento singular en comparación con los métodos estadísticos, donde el error al ser acumulativo siempre es mayor para una mayor cantidad de años a predecir, dado que no pueden segmentar su análisis en secuencias y subsecuencias a la vez.

El segundo análisis variacional implementado, también denominado de sensibilidad a la importancia de los features, es determinar el número y tipo de features que más ayudan a predecir la demanda de carga aérea internacional a partir de los restantes 10 features, 9 de ellos sacados del contexto socioeconómico y el otro con la carga aérea doméstica (DOM). Para ello, y dada la gran multiplicidad de combinaciones de posibles features para cada escenario, se han realizado todas las posibles combinaciones de 2 features, además de considerar el escenario más simple de solo un feature.

Las siguientes configuraciones proceden de implementar el pronóstico de un escenario con 3 features, 2 escenarios con 5 features, un escenario de 10 features y el escenario completo con los 11 features. Se insiste en la complejidad de búsqueda en el espacio de todas las posibles combinaciones de features, por lo que se han elegido estos pocos, y cuando se han considerado combinaciones de varios features se han elegido los que mejor pronóstico daban para el caso (base) de combinaciones de 2 features. El MAPE medio y desviación típica (al ejecutar cada escenario 10 veces) es el criterio elegido para seleccionar la combinación de features más óptima. Para ello se han fijado los n_lags y n_outs igual a 6 con 2 subsecuencias de 3 años cada una, obtenidos del análisis variacional previo. En la Tabla 3 se muestran los resultados.

Tabla 3. Análisis variacional para encontrar los mejores features, en términos MAPE y sus combinaciones, para predecir la demanda de carga aérea internacional

Escenario de feature de entrada	features	mean MAPE	std MAPE	Ranking
INT	1	13,24	3,84	5to mejor
GDP, INT	2	8,35	2,51	el mejor
PCG, INT	2	9,72	7,18	2do mejor
POP, INT	2	22,99	1,5	11vo mejor
IPI, INT	2	23,94	1,76	12vo mejor
CPI, INT	2	26,3	1,6	13vo mejor
BMR, INT	2	44,72	4,43	15vo mejor
FDI, INT	2	12,17	2,51	4to mejor
EXP, INT	2	20,96	12,52	9no mejor
IMP, INT	2	11,79	4,6	3ro mejor
DOM, INT	2	31,14	15,5	14vo mejor
GDP, DOM, INT	3	51,66	17,58	16vo mejor
GDP, EXP, IMP, DOM, INT	5	18,13	2,4	7mo mejor
GDP, PCG, FDI, IMP, INT	5	15,47	1,82	6to mejor
GDP, PCG, POP, IPI, CPI, BMR, EXP, IMP, DOM, INT	10	21,5	6,96	10mo mejor
GDP, PCG, POP, IPI, CPI, BMR, FDI; EXP, IMP, DOM, INT	11	18,25	3,99	8vo mejor

La Tabla 3 muestra resultados relevantes, como que cuando solo se usa un feature (el mismo INT que se desea predecir) su MAPE es superior a cuando se emplean el feature INT junto a otros features. También muestra que cuando se utilizan todos los features disponibles (11 en total), su predicción MAPE no es muy buena, debido a que algunas de esas variables además de no influir en la variable carga aérea internacional (INT), introducen ruido al aprendizaje de los patrones de los features, lo que implica el empeoramiento de los resultados en términos de MAPE. Como se aprecia en la Tabla 3, los mejores resultados predictivos lo proporcionan las combinaciones de dos variables (incluido el que se desea predecir), destacando como ganador el feature GDP con el que se encuentra más fuertemente acoplado las variaciones de la demanda de carga aérea internacional (característica ya identificada en varias investigaciones [47, 48, 49, 50]), seguido por el PCG (PIB per cápita).

El siguiente feature en importancia para determinar la predicción de la variable INT son las importaciones (IMP). El feature FDI (Foreign Direct Investment) es la siguiente variable en importancia. Vuelve a llamar la

atención, como hallazgo del algoritmo, que cuando se combinan los 5 mejores features la predicción está por detrás de las mejores predicciones hechas por cada uno por separado. Lo cual se puede asociar a la complejidad que implica sacar los patrones cuando se correlacionan entre sí varios features a la vez.

Para concluir este análisis en la Figura 6 se muestra la predicción a corto plazo de la demanda de carga aérea internacional (INT) (en color naranja), en contraste con las curvas de las series históricas de demanda de carga aérea internacional (INT) y de GDP (en color azul) (como feature más relevante para la determinación de la demanda de carga aérea internacional). En color rojo se identifica la línea predictiva que hace el modelo ConvLSTM2D de la serie histórica INT (y la manera de cómo va aprendiendo de menos a más ajustándose mejor en los últimos años de la serie histórica). En la curva de predicción se observa una recuperación importante pero que no alcanza a recuperar el valor existente en el periodo pre pandémico, junto a un nuevo ciclo que hará que vuelva a caer, en el futuro inmediato, la demanda de carga aérea internacional. Este escenario óptimo es el resultante del análisis variacional anterior, donde n_lags es igual a n_outs e igual a 6 años considerando 2 subsecuencias de 3 años cada una y para el caso de 2 features donde el feature más relevante para la carga aérea internacional es el GDP.

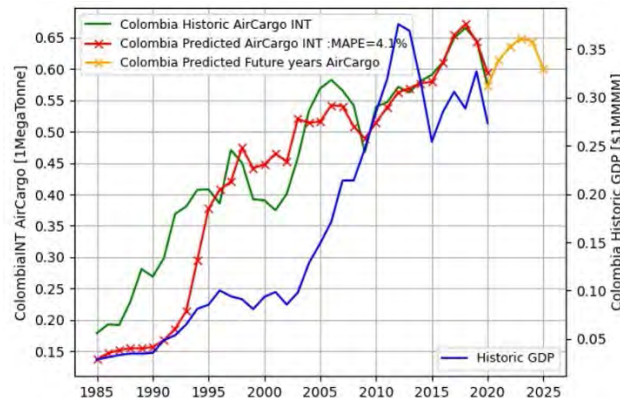


Figura 6. Pronóstico de la demanda de carga aérea internacional INT (en millones de toneladas) como función de la propia historia de dicha variable y de la evolución de la serie histórica del GDP (en US\$x10¹²)

4.2 Predicción de la demanda de carga aérea doméstica

El primer análisis variacional implementado consiste en buscar en el espacio de longitud de secuencias la correspondiente al número de años n_outs a predecir que sean óptimos, en el sentido de que proporcionen el menor MAPE, medido este en el último ciclo de n_outs de la serie histórica. Para simplificar el problema se ha elegido n_outs (años futuros a predecir) igual a n_lags (años previos), y un escenario con solo dos inputs PCG y la propia demanda de carga aérea doméstica (DOM), y se han parametrizado las subsecuencias o subciclos en los que se puede dividir cada secuencia de n_lags . La elección de los ciclos y subciclos en los que se divide la serie histórica es importante de cara a facilitar al modelo la extracción de los patrones de comportamiento de la serie DOM. Como el proceso de aprendizaje de los modelos ML/DL es estocástico, se ha repetido 10 veces el entreno de cada configuración paramétrica de los escenarios del modelo para obtener la media y la desviación típica del MAPE.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los MAPE como función de los diferentes n_outs y del número de subsecuencias, a las cuales corresponde un determinado número de años. Hay que destacar que dichos valores MAPE están referidos a un dataset cuyos valores han sido escalados, normalizados y estandarizados y por tanto no se corresponden con la escala original.

Tabla 4. Análisis variacional para encontrar las longitudes óptimas de las secuencias y subsecuencias que dan el menor MAPE en la predicción de la demanda de carga aérea doméstica

n_lags years	n_Subseqs	subseq years	mean MAPE	std MAPE	Ranking
4	2		2.68,68	1,73	3ro mejor
8	2		4.65,83	3,46	2do mejor
12	3		4.187,88	62,25	3ro mejor
12	4		3.209,31	55,05	4to mejor
6	2		3.42,05	2,14	el mejor

Un primer resultado en la predicción de escenarios DOM (mostrado en la Tabla 4) es que los MAPE son más de cinco veces superiores, esto puede ser consecuencia de la posible alta variabilidad (o volatilidad) intrínseca de la serie histórica de la variable carga aérea doméstica DOM. Lo que implicaría que el aprendizaje de los patrones de comportamiento es un problema más complejo en la demanda de carga aérea doméstica que en la demanda de carga aérea internacional. En la Tabla 4 se puede apreciar que el número de n_outs , que es igual al de n_lags más óptimo, es también de 6 años, los cuales se toman en 2 subsecuencias de 3 años cada una. La explicación de por qué ha resultado un MAPE mayor cuando se toman menos años, p.e. 4 años y 2 subciclos de 2 años, se encuentra en que los modelos ML/DL al predecir al mismo tiempo una determinada cantidad de años futuros, a partir de los patrones encontrados en los ciclos (n_lags) y sus subciclos previos, estas longitudes menores no son capaces de recoger toda la información que aparece en los ciclos de 6 años con 2 subciclos de 3 años cada uno.

Finalmente, cuando estos ciclos son de mayor longitud, como 8 o 12 años, los errores son mayores que cuando son 6 años, también influenciados por la mayor cantidad de años a predecir. Este comportamiento recogido en la información que contienen los tensores de 5D de los inputs X y de 3D en las salidas Y es singular frente a los métodos estadísticos, donde el error al ser acumulativo siempre es mayor para una mayor cantidad de años a predecir, dado que no pueden segmentar su análisis en secuencias y subsecuencias a la vez.

El segundo análisis variacional implementado, también denominado de sensibilidad a la importancia de los features, es determinar el número y tipo de features que mejor ayudan a predecir la demanda de carga aérea doméstica a partir de los restantes 10 features, 9 de ellos socioeconómicos, recogidos en la serie histórica. Para ello y dada la gran multiplicidad de combinaciones posibles de features, se han realizado todas las posibles combinaciones de 2 features, además de considerar el escenario más simple de 1 feature. Adicionalmente se han implementado un escenario con 3 features, 1 escenario con 4 features, y un último escenario con todos los features (11). El MAPE medio y desviación típica (al ejecutar cada escenario 10 veces) es el criterio elegido para seleccionar la combinación de features más óptima. Para ello se han fijado los n_lags y n_outs en 6 con 2 subsecuencias de 3 años, obtenidos del análisis variacional previo. En la Tabla 5 se muestran los resultados.

Tabla 5. Análisis variacional para encontrar los mejores features y sus combinaciones para predecir la demanda de carga aérea doméstica

feature de entrada	features	mean MAPE	std MAPE	Ranking
DOM	1	66,41	10,31	5to mejor
GDP, DOM	2	51,18	3,70	3ro mejor
PCG, DOM	2	42,05	2,14	el mejor
POP, DOM	2	133,34	17,19	12vo mejor
IPI, DOM	2	135,37	12,77	13vo mejor
CPI, DOM	2	138,62	11,52	14vo mejor
BMR, DOM	2	95,45	10,50	10mo mejor
FDI, DOM	2	69,00	7,32	7mo mejor
EXP, DOM	2	42,14	4,87	2do mejor
IMP, DOM	2	71,47	16,55	8vo mejor
INT, DOM	2	121,80	11,00	11vo mejor
PCG, EXP, DOM	3	74,11	14,76	9vo mejor
PCG, EXP, FDI, DOM	4	54,56	2,66	4to mejor
GDP, PCG, POP, IPI, CPI, BMR, FDI; EXP, IMP, INT, DOM	11	67,96	4,46	6to mejor

Los resultados, mostrados en la Tabla 5, muestran que cuando solo se usa 1 feature (el mismo DOM que se desea predecir) su MAPE es superior (quedando en quinto lugar del ranking) a cuando se emplean el feature DOM junto a otros features. Los resultados también muestran que cuando se utilizan todos los features disponibles (11), su predicción MAPE no es muy buena, debido a que algunas de esas variables además de no influir en la demanda de carga aérea doméstica introducen ruido al aprendizaje de los patrones de los features, lo que implica el empeoramiento de los resultados en términos de MAPE. Como se aprecia en la Tabla 5, los mejores resultados predictivos lo proporcionan las combinaciones de dos variables (incluida la que se desea predecir). Siendo ganador el feature de PIB per cápita (PCG), con el que se encuentra más

fuertemente vinculado la demanda de carga aérea doméstica, seguido del feature EXP (exportaciones). El siguiente feature en importancia, para determinar la predicción de la demanda de carga aérea doméstica, es el GDP. El cuarto feature en importancia es la combinación de los 4 features PCG, EXP, FDI y DOM, lo que significa que el modelo encuentra patrones relevantes en la combinación de estos 4 features.

El quinto feature en importancia es considerar solo a la serie (histórica) temporal de la demanda de carga aérea doméstica, lo que evidencia la aportación positiva de combinarlos con otros features frente a considerar solo la serie aislada DOM. Finalmente, hay que destacar que la demanda de carga aérea doméstica es sensible a incorporar más cantidad de features para predecir el desarrollo de la misma, frente al acoplamiento a otros features aislados como FDI, IMP, IPI, CPI, etc., lo cual resulta otro hallazgo diferencial de la demanda de carga aérea doméstica respecto a las predicciones de la demanda de carga aérea internacional.

Finalmente, en la Figura 7 se muestra la predicción de la demanda de carga aérea doméstica a corto plazo (en color naranja), en contraste con las curvas de las series históricas de carga aérea doméstica (en color verde) y de PCG (en color azul) como feature más relevantes. En color rojo se identifica la curva predictiva que hace el modelo ConvLSTM2D de la serie histórica DOM (muestra como esta curva va aprendiendo de menos a más ajustándose mejor en los últimos de la serie histórica).

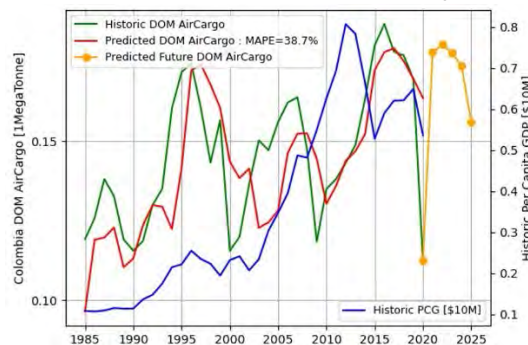


Figura 7. Pronóstico de la demanda de carga aérea doméstica (DOM) (en millones de toneladas) como función de la serie histórica de la propia variable y de la evolución histórica del PCG (en US\$x10⁴)

5. CONCLUSIONES

La previsión de la demanda de transporte carga aérea es extremadamente importante tanto para los operadores aéreos como para las autoridades aeroportuarias. Previsiones lo más precisas posibles son fundamentales para los transportistas de cara a su planificación a corto y medio plazo (para el diseño de rutas, planificación de la flota, operativa, financiera y de personal, etc.). Para las autoridades aeronáuticas nacionales o gestores aeroportuarios disponer de pronósticos precisos (lo cual habitualmente ya realizan vía los planes maestros aeroportuarios) ayuda a la toma de decisiones oportunas (en tiempo y forma) sobre políticas de inversión (pública o privada) para la expansión y modernización de aeropuertos (o construcción de nuevos), como así también contribuye al desarrollo de políticas tarifarias que incentiven la captación de nuevos operadores aéreos o la apertura de nuevas rutas. Este ha sido un objetivo de la presente investigación.

Un segundo objetivo del presente trabajo fue estimar el patrón de recuperación de la demanda de carga aérea, en el país-caso de estudio, considerando el fuerte impacto que ocasionó la pandemia mundial del Covid-19 en el año 2020 (cuyos datos se incluyeron en la investigación). Los resultados muestran una rápida recuperación de la demanda de carga aérea, muy similar (aunque ligeramente más rápida) a la que experimentará la demanda de pasajeros aéreos, según se compara con una investigación reciente sobre el país-caso de estudio [61].

En cuanto a la metodología propuesta para el análisis, principal aportación de esta investigación a la literatura científica, este trabajo muestra la idoneidad del uso de métodos de ML/DL como el ConvLSTM2D en las predicciones de las series temporales aplicadas al transporte aéreo frente a los métodos estadísticos clásicos, al poder incorporar análisis no lineales y multivariable con extracción de patrones por segmentos

de ciclos y sub ciclos de las series históricas. El análisis variacional incorporado para determinar las longitudes óptimas de ciclos y sub ciclos (para el aprendizaje de las series históricas) junto con la determinación óptima de los features y las combinaciones entre ellos, aporta la configuración necesaria que define el escenario nominal de trabajo sobre el que realizar el pronóstico de las series temporales de carga aérea, doméstica e internacional, con los menores errores. La metodología ML/DL aquí desarrollada incorpora un análisis de features singular para poder actuar sobre las variables que más influyen en la demanda de transporte de carga aérea, y donde se han mostrado las singularidades de dependencias más relevantes.

Futuras investigaciones invitan a plantear otras configuraciones de arquitectura de redes neuronales artificiales usando estas capas ConvLSTM2D como núcleo del modelo ML/DL, pero cambiando los tipos de capas, cantidad y estructuras de las capas adicionales que las acompañan, como forma de mejorar el MAPE predictivo.

REFERENCIAS

- [1] TRB. (2002). Aviation Demand Forecast: Survey of Methodologies. Transportation Research Board.
- [2] Horonjeff R. et al. (2010). Planning and Design of Airports. McGraw-Hill.
- [3] Wells A. y Young S. (2004). Airport Planning & Management. McGraw-Hill.
- [4] Ashford N. et al. (2011). Airport Engineering. John Wiley & Sons.
- [5] Janic M. (2021). System Analysis and Modelling in Air Transport. CRC Press.
- [6] Janic M. (2009). Airport analysis, planning and design: demand, capacity and congestion. Nova Science Publishers.
- [7] ICAO. (1987). Master Planning. Part 1. Doc 9184. ICAO.
- [8] Rodríguez Y. et al. (2020). Air traffic forecast in post-liberalization context: A Dynamic Linear Models approach. *Aviation* 24(1), 10-19.
- [9] ICAO. (2006). Manual on Air Traffic Forecasting. Doc 8991. ICAO.
- [10] ACI. (2016). Traffic Forecast. Airports Council International.
- [11] Kazda A. y Caves R. (2015). Airport design and operations. Emerald.
- [12] de Neufville R. y Odoni A. (2013). Airport Systems, Planning, Design, and Management. McGraw-Hill.
- [13] ICAO. (2020). Presentation of 2019 Air Transport Statistical Results. ICAO.
- [14] IATA. (2021a). World Air Transport Statistics 2021. IATA.
- [15] IATA. (2021b). Air Cargo Market Analysis. IATA.
- [16] World Bank. (2022). Air transport. Recuperado de: <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.GOOD.MT.K1>
- [17] Gudmundsson S. et al. (2021). Forecasting temporal world recovery in air transport markets in the presence of large economic shocks: The case of Covid-19. *Journal of Air Transport Management* 91, 102007.
- [18] JADC. (2021). Worldwide Market Forecast 2020-2040. Japan Aircraft Development Corporation.
- [19] Boeing. (2020). World Air Cargo Forecast 2020-2039. Boeing.
- [20] Dantas T. et al. (2017). Air transportation demand forecast through Bagging Holt Winters methods. *Journal of Air Transport Management* 59, 116-123.
- [21] Tsui W. et al. (2014). Forecasting of Hong Kong airport's passenger throughput. *Tourism Management* 42, 62-76.
- [22] Tascón D. y Díaz O. (2021). Air traffic forecast and its impact on runway capacity. A System Dynamics approach. *Journal of Air Transport Management* 90, 1-10.
- [23] Suryani E. et al. (2012). Dynamic simulation model of air cargo demand forecast and terminal capacity planning. *Simulation Modelling Practice and Theory* 28, 27-41.
- [24] Suryani E. et al. (2010). Air passenger demand forecasting and passenger terminal capacity expansion: A system dynamics framework. *Expert Systems with Applications* 37, 2324-2339.
- [25] Zhang G. et al. (1998). Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. *International Journal of Forecasting* 14, 35-62.
- [26] Srisaeng P. et al. (2015). Using an artificial neural network approach to forecast Australia's domestic passenger air travel demand. *World Review of Intermodal Transportation Research* 5(3), 281-313.
- [27] Mostafaiepour A. et al. (2018). Prediction of air travel demand using a hybrid artificial neural network (ANN) with Bat and Firefly algorithms: a case study. *The Journal of Supercomputing* 74(10), 5461-5484.
- [28] Gupta V. et al. (2019). Airlines passenger forecasting using LSTM based recurrent neural networks. *International Journal Information Theories and Applications* 26(2), 178-187.
- [29] Dingari M. et al. (2019). Air Traffic Forecasting Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Scientific & Technology Research* 8(10), 556-559.
- [30] Bao Y. et al. (2012). Forecasting Air Passenger Traffic by Support Vector Machines with Ensemble Empirical Mode Decomposition and Slope-Based Method. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, ID 431512, 1-12.
- [31] ACI. (2021). Annual World Airport Traffic Report. Airports Council International.

- [32] Millstein F. (2018). Convolutional Neural Networks in Python. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- [33] Sewak M. et al. (2018). Practical Convolutional Neural Networks. Packt Publishing.
- [34] Yang J. et al. (2015). Deep convolutional neural networks on multichannel time series for human activity recognition. En Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence.
- [35] Malhotra P. et al. (2015). Long-short term memory networks for anomaly detection in time series. En European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning. Bruges, Belgium.
- [36] Hermans M. y Schrauwen B. (2013). Training and analyzing deep recurrent neural networks. Working Paper, Ghent University.
- [37] Ketkar N. y Moolayil J. (2021). Deep Learning with Python. Springer.
- [38] Pedrycz W. y Chen S. (2020). Deep Learning: Concepts and Architectures. Springer.
- [39] Calin O. (2020). Deep Learning Architectures. A Mathematical Approach. Springer.
- [40] Díaz O. y Pulido L. (2019). Measurement of airport efficiency. The case of Colombia. *Transport and Telecommunication* 20(1), 40-51
- [41] Díaz O. (2021). The role of regional airports in connectivity and regional development. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 49(4), 1-13.
- [42] Díaz O. y Zea J. (2018). Influence of the liberalization of the air transport industry on configuration of the traffic in the airport network. *Transportation Research Procedia* 33, 43-50.
- [43] Aerocivil. (2022). Recuperado: <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/boletines-operacionales>
- [44] Banco de La República. (2022). Estadísticas. Recuperado: <https://www.banrep.gov.co/es/-estadisticas>
- [45] Airbus. (2016). Global Market Forecast 2016–2035. Airbus.
- [46] Boeing. (2016). World Air Cargo Forecast 2016–2035. Boeing.
- [47] Hakim M. y Merkert R. (2016). The causal relationship between air transport and economic growth: empirical evidence from South Asia. *Journal of Transport Geography* 56, 120–127.
- [48] Morrell P. (2011). *Moving Boxes by Air: The Economics of International Air Cargo*. Ashgate.
- [49] Ashford N. et al. (2013). *Airport Operations*. McGraw-Hill.
- [50] Halpern N. y Graham A. (2018). *Air Transport Management*. Routledge.
- [51] Díaz O. y Alonso C. (2021). Impact of airport policies on regional development. Evidence from the Colombian case. *Regional Science Policy & Practice* 1–26.
- [52] DANE. (2022). Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado: <https://www.dane.gov.co/>
- [53] Hu W. et al. (2019). Feature extraction and classification based on spatial-spectral ConvLSTM neural network for hyperspectral images. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*. arXiv:1905.03577v1.
- [54] Tariq S. et al. (2020). A convolutional LSTM based residual network for deepfake video detection. arXiv:2009.07480v1.
- [55] Aggarwal C. (2018). *Neural Networks and Deep Learning*. Springer.
- [56] Bianchi F. et al. (2017). Recurrent neural networks for short-term load forecasting. Springer.
- [57] Blokdyk G. (2017). Recurrent neural network. *The Art of Service*.
- [58] Mandic D. y Chambers J. (2001). *Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability*. Wiley.
- [59] Donahue J. et al. (2015). Long-term recurrent convolutional networks for visual recognition and description. En *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Boston, USA.
- [60] Goodfellow I. et al. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
- [61] Muros J. y Díaz O. (2021). Utilización de algoritmos de redes neuronales artificiales en el pronóstico de la demanda de pasajeros aéreos. En Serna E. (ed.), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*. Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.

Pronóstico de demanda de tráfico aéreo mediante metodología Bayesian Structural Time Series BSTS

Yesid Rodríguez Pinzón¹

Oscar Díaz Olariaga²

¹Universidad Konrad Lorenz

²Universidad Santo Tomás
Colombia

La planificación aeroportuaria y por lo tanto el desarrollo de las infraestructuras aéreas depende en gran medida de los niveles de demanda que se prevén para el futuro. Para planificar las inversiones en infraestructura de un sistema aeroportuario y satisfacer las necesidades futuras, es esencial predecir el nivel y la distribución de la demanda, tanto de pasajeros como de carga aérea. Para este trabajo se realizó un pronóstico, a medio-largo plazo (10 años), de la demanda de pasajeros y de carga aérea, aplicado a un caso de estudio concreto (Colombia), teniendo en cuenta el impacto en el tráfico aéreo en el periodo más severo de la pandemia del covid-19 (2020) y el periodo de la postpandemia (2021). Para conseguir el objetivo y como planteamiento metodológico se desarrolla un modelo del tipo Bayesian Structural Time Series BSTS, diseñado para trabajar con datos de series temporales, utilizado para la selección de características, la previsión de series temporales, la predicción inmediata y la inferencia del impacto causal. De los resultados obtenidos se destacan dos aspectos: 1) que tanto la demanda como la tendencia de crecimiento de la misma se recuperará muy pronto (en solo un par de años) con respecto al año prepandemia (2019), en el caso de estudio analizado; y 2) el modelo presenta valores MAPE aceptables (entre 1% y 7%, según la variable a pronosticar), lo que convierte al método BSTS en una metodología alternativa viable para el cálculo de pronóstico de tráfico aéreo.

¹ Magíster en Estadística.

Contacto: heivary.rodriquez@konradlorenz.edu.co

² Doctor en Ingeniería Aeronáutica.

Contacto: oscardiazolariaga@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los planes para el desarrollo de los distintos componentes del sistema aeroportuario dependen en gran medida de los niveles de actividad que se prevén para el futuro. Para planificar las instalaciones e infraestructuras de un aeropuerto, o sistema/conjunto de aeropuertos, y poder satisfacer las necesidades futuras, es esencial predecir el nivel y la distribución de la demanda en los diversos componentes del sistema aeroportuario [1]. Pronosticar la demanda en una industria tan dinámica y sensible a factores exógenos como la aviación es una tarea extremadamente difícil.

No obstante, es necesario realizar estimaciones de tráfico aéreo como paso previo a la planificación y diseño de las instalaciones aeroportuarias, ya sea de un aeropuerto o de un sistema o red aeroportuaria [2, 3].

La comprensión de los patrones de demanda futuros permite al planificador aeroportuario evaluar el desempeño futuro del aeropuerto y con ello recomendar programas de desarrollo consistentes para estimar los costos asociados con estos planes de desarrollo y para proyectar las fuentes y el nivel de ingresos para respaldar las inversiones de capital a realizar [4]. El pronóstico de la demanda es un requisito básico para desarrollar un plan maestro de aeropuerto o un plan de sistema aeroportuario a nivel regional o nacional, entendiendo con ello toda la red aeroportuaria de una región o país [2, 5-10].

Finalmente, la experiencia práctica demuestra que los pronósticos de tráfico aéreo no suelen ser precisos cuando las previsiones se realizan a largo (20 años) o muy largo plazo (30 años), pero inexorablemente las previsiones a muy corto, corto, medio y medio-largo plazo son importantes para el planificador o tomador de decisión, ya que comprenden un periodo habitual de planificación aeroportuaria (o de un sistema/red aeroportuaria) [11-13].

Entonces, el objetivo de la presente investigación es realizar un pronóstico a medio-largo plazo (10 años) de demanda de pasajeros aéreos y carga aérea (domésticos e internacionales para ambas variables), para el cual se ha utilizado como caso de estudio Colombia (red completa de aeropuertos en su conjunto), con un periodo de disponibilidad de datos mensuales de tráfico: 1992-2021, con la especial particularidad de incluir en el análisis los datos de demanda de los años 2020 (el cual se ha visto severamente afectado por la pandemia del Covid-19) y 2021 (periodo de transición y recuperación de la pandemia).

Para conseguir tal objetivo, y como técnica metodológica, se desarrolla un modelo del tipo Bayesian Structural Time Series BSTS, el cual posee ventajas significativas respecto a modelos clásicos como el modelo SARIMA, por ejemplo, Jalali y Rabotyagov [14] mencionan ciertas ventajas de los modelos estado-espacio como el BSTS, en primer lugar evidencian que todos los modelos ARIMA se pueden expresar como una forma de estado-espacio, también que se solucionan inconvenientes de sobreentrenamiento respecto a los otros modelos cuando se cuenta con un limitado número de observaciones en el tiempo, y son capaces de asignar parámetros de incertidumbre lo cual le da ventaja cuando realizan pronósticos en el tiempo.

2. MARCO REFERENCIAL

En lo que se refiere al desarrollo de pronósticos para el transporte/tráfico aéreo, los académicos vienen presentando investigaciones formales, con diferentes metodologías y planteamientos, desde hace aproximadamente tres décadas. Ahora bien, conviene comentar que pesar de su gran importancia el análisis o investigación de la previsión de la demanda de transporte de carga aérea no presenta (históricamente) un gran número de publicaciones, o al menos no tanto como el pronóstico de demanda de pasajeros aéreos [15].

Se han desarrollado una diversidad de modelos para pronosticar la demanda de tráfico aéreo (pasajeros o carga aérea), muchos de los métodos de predicción más utilizados se pueden aunar en dos grandes grupos: modelos económicos y modelos de series temporales [16]. Los métodos económicos se centran en la correlación entre la demanda de pasajeros y múltiples variables, como la influencia de los cambios en el entorno económico y el sistema de tráfico, y luego los modelos de pronóstico se establecen mediante una serie de ecuaciones.

Los modelos comúnmente utilizados incluyen análisis de regresión [17], prueba de causalidad [18], modelo logit [19], y modelo de gravedad [20]. Los métodos de series temporales se basan principalmente en datos históricos para predecir mediante la extracción de la relación intrínseca entre los datos actuales y las series de observaciones pasadas. Los diversos modelos de series temporales se han utilizado para pronosticar la demanda de pasajeros aéreos, como las técnicas de suavizado [21], el modelo de Markov adaptado [22], ARIMA / SARIMA [23], método de ajuste estacional [24], etc.

Debido a la característica no lineal de la demanda de transporte aéreo, los enfoques económicos y de series temporales se critican severamente debido a su capacidad de pronóstico efectiva muy limitada y pobre [23]. Por ello algunos académicos intentan explorar otras metodologías para el pronóstico de demanda de tráfico aéreo, como Dynamic Linear Models DLM [8], que con respecto a las metodologías habituales de cálculo de pronóstico presenta las siguientes ventajas: detecta tendencias estocásticas que se encuentran ocultas en las series de tiempo [25] así como la detección de cambios estructurales que permiten estimar el efecto variable en el tiempo de choques exógenos sin aumentar el número de parámetros [26]; adicionalmente, la estructura de independencia condicional sobre la que se basa la dinámica del estado permite considerar predicciones considerando un algoritmo recursivo [27].

Otro planteamiento que se ha utilizado para el pronóstico de demanda de pasajeros aéreos es el Dinámica de Sistemas [28-30], que incorpora un conjunto de herramientas que permiten comprender entornos complejos, utiliza herramientas como diagramas de causalidad, fomentando el pensamiento sistémico entre los gestores de procesos, captura la complejidad dinámica de un sistema dado y proporciona la ventaja considerable de simular el modelo para evaluar los resultados de interacción variable y anticipar los efectos colaterales a largo plazo de las políticas antes de su implementación.

Por otro lado, se está utilizando, y desde ya hace varios años, metodologías basadas en redes neuronales artificiales ANN para el pronóstico de tráfico aéreo. Varias características distintivas de las ANN las hacen viables o convenientes para un cálculo de pronóstico de demanda de tráfico aéreo [31-36]:

1. A diferencia de los métodos tradicionales las ANN son métodos auto adaptativos basados en datos en el sentido de que existen pocas suposiciones a priori sobre los modelos para los problemas en estudio. Aprenden de los ejemplos y capturan relaciones funcionales sutiles entre los datos, incluso si las relaciones subyacentes son desconocidas o difíciles de describir.
2. Las ANN son aproximadores funcionales universales, se ha demostrado que una red puede aproximar cualquier función continua con cualquier precisión deseada. Las ANN tienen formas funcionales más generales y flexibles (que las que de los métodos estadísticos tradicionales) que pueden manejar eficazmente.
3. Las ANN no son lineales, la predicción ha sido durante mucho tiempo el dominio de las estadísticas lineales. Los enfoques tradicionales de la predicción de series de tiempo, como el método de Box-Jenkins o ARIMA, asumen que las series de tiempo en estudio se generan a partir de procesos lineales.

Pero no es razonable suponer, a priori, que una realización particular de una serie de tiempo determinada se genera mediante un proceso lineal. Por ello, las redes neuronales artificiales, que son enfoques basados en datos no lineales, son capaces de realizar modelos no lineales sin conocimiento previo sobre las relaciones entre las variables de entrada y salida.

Y finalmente, en lo que respecta a la metodología utilizada en este trabajo para el desarrollo de demanda de tráfico aéreo, BSTS, muy poco se encuentra en la literatura científica. Un estudio reciente [37] utiliza BSTS para estimar el impacto del Covid-19 en la demanda de vuelos y las emisiones de CO₂ generados por los viajes aéreos en Brasil, en el periodo más duro de pandemia (año 2020). Por otro lado, otro autor [38], utilizando BSTS, realizan un pronóstico a muy corto plazo (1 año) de pasajeros aéreos para en el Aeropuerto Internacional de Kuwait KIA, los autores utilizan varios modelos de pronóstico para comparar su eficiencia (entre ellos BSTS), y de sus resultados concluyen que el modelo BTST presenta los mejores resultados (menor valor de MAPE) de entre todos los modelos utilizados. Otros académicos [39] realizan un pronóstico (a muy corto plazo, 2-3 años) de la demanda de carga y pasajeros aéreos de la industria de la aviación india

utilizando el promedio móvil integrado autorregresivo ARIMA y los modelos de series temporales estructurales bayesianas BSTS.

3. MARCO CONCEPTUAL

EL modelamiento de variables en el tiempo ha sido un tema trabajado por múltiples ramas académicas, es especial los State Space Model SSM, que fueron presentados inicialmente por ingenieros de control (a partir de Kalman [40]), los cuales encontraron una amplia aplicación en procesos que necesitan una actualización continua [41]. Dichos modelos cada vez son más usados en la solución de problemas con variables de tipo temporal, incluyendo la estimación de los parámetros, el suavizamiento y las predicciones [42]. El uso de modelos de series de tiempo de corte estructural se pueden clasificar como modelos de espacio-estado para datos de series temporales, los cuales tienen ventajas como su flexibilidad dado que modelos como los ARIMA o VARMA se pueden expresar como un modelo de espacio-estado; además son modelos modulares, dado que el modelo se puede construir a partir de varios modelos de componentes de estado que capturen las características más importantes de los datos, por ejemplo, los componentes de estado son utilizados en la captura de la tendencia, la estacionalidad, entre otros [43].

A partir de los trabajos de [44, 45] se profundizó y extendió el desarrollo del modelo BSTS el cual se puede usar en la selección y pronóstico a corto y largo plazo de series de tiempo. Por otra parte, otras investigaciones [46, 47] presentan la inferencia de relaciones causales del modelo. Complementando los trabajos anteriores, se encuentra uno de los pilares del modelo el cual usa el Filtro Kalman para poder identificar el estado no medible del sistema dinámico lineal del modelo [48, 49]. Posterior al Filtro Kalman, se tiene en cuenta la selección de la variable *spike and slab* [50], y con el cual se seleccionan los predictores de regresión a lo largo del modelamiento y, por último, se tiene en cuenta dentro del modelo bayesiano el cálculo del promedio [51], el cual presenta la combinación de los resultados de la selección de características y el cálculo de predicción. El uso de lo expuesto anteriormente permite tener una interpretación bayesiana natural y al estar presentes en un modelo BSTS permitirá obtener mejores resultados [52-54].

De acuerdo con Santana [55] los modelos de serie de tiempo estructurales bayesianos BSTS está estructurado bajo dos componentes, por un lado, un módulo de series de tiempo que captura patrones de tendencia o estacionalidad en los datos. Por otro lado, un elemento de regresión que termine incluir datos exógenos potenciales para reducir el error en el pronóstico. En cuanto a la metodología para el desarrollo de este modelo, se encuentra el filtro de Kalman, un algoritmo que integra la información suministrada para estimar el valor de las variables objeto.

Según [56] los BSTS son útiles para el pronóstico de series temporales. ya que, estiman la incertidumbre en las predicciones y la inferencia de su impacto causal, a partir del uso de intervalos creíbles bayesianos, que sintetizan la incertidumbre de la inferencia. Entre las ventajas de este tipo de modelamiento se destacan, por un lado, que brinda parámetros para la correcta inclusión de las variables y, por otro lado, ofrece la alternativa de incluir la prioridad y peso de las variables del modelo. Además, [57] señalan que este modelo puede estimar el efecto causal para una única variable objetivo, generando un pronóstico para sus valores futuros con base en un control sintético, compuesto de series de tiempo no tratadas que fueron predictivas de la variable de estudio objetivo en el tratamiento previo de los datos.

Finalmente, [58] destacan la flexibilidad y adaptabilidad que tiene el BSTS para ajustarse a las necesidades de un análisis objetivo, ya que este modelo permite la toma de decisiones, en la temporalidad de las predicciones (corto o largo plazo), sobre cómo incluir las variables regresoras y si los datos contienen estacionalidad.

4. CASO DE ESTUDIO

Los datos para el desarrollo de la presente investigación se obtienen del país-caso de aplicación (o de estudio) Colombia, actualmente el tercer mercado aéreo del sub continente latinoamericano, y quinto de las Américas, por volumen de tráfico gestionado [59, 60]. En Colombia se liberalizó la industria del transporte aéreo/aviación a principios de la década de 1990. Esto trajo consigo reformas estructurales tanto

en el sector aeroportuario como en el de las líneas aéreas, todo ello a través de una ininterrumpida batería de políticas públicas (aún hoy vigentes) que incluye no solo aspectos normativos y regulatorios sino también agresivos programas de inversión pública y privada en infraestructura y tecnología [61].

Sobre la gestión de la infraestructura aeroportuaria Colombia ha seguido la tendencia regional de concesionar la administración de dichas infraestructuras al sector privado [62]. Entonces, desde mediados de la década de 1990, y en varias fases temporales, denominadas generaciones, el gobierno colombiano entregó en concesión varios aeropuertos del país, un total de 19, incluidos los más grandes e importantes (y que gestionan el grueso del tráfico aéreo de toda la red) [63]. Como resultado de las políticas públicas, tanto de privatización como de inversión pública y privada en infraestructura aeroportuaria, y acompañadas con políticas de desregulación del sector aerocomercial, donde las tarifas aéreas están totalmente liberalizadas desde 2012 [64].

Desde el inicio de la liberalización de la industria (1991) y hasta el año 2019, el transporte de pasajeros (totales) creció casi un 800% [65, 66]. Por otro lado, en Colombia la entrada al mercado de operadores aéreo privados con un modelo de negocio de servicio completo FSC, se produjo muy pronto luego de la liberalización del sector (principios-mediados de la década de 1990). Pero la entrada al mercado de las líneas Low-Cost Carrier LCC, fue muchos años posterior a la liberalización (2012) [64].

En relación con el impacto de la pandemia del Covid-19 en el país-caso de estudio, dicha circunstancia generó, en el peor año de la pandemia, 2020, una estrepitosa caída de la demanda de pasajeros aéreos (85% en pasajeros domésticos, 75% en pasajeros internacionales, ambos con respecto a 2019); sin embargo, la demanda de carga aérea (total) solo cayó un 16% con respecto al 2019, concepto donde el impacto de la pandemia fue mucho menor [67].

5. MÉTODO

5.1 Modelo

Se presenta el modelo estructural bayesiano mediante el comportamiento de la serie de tiempo usando dos ecuaciones, la ecuación de observación y la ecuación de transición [44]. La ecuación de observación está definida mediante la ecuación (1).

$$y_t = \mu_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

con $t = 1, 2, \dots, T$ y $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$, lo que denota esta ecuación es que y_t es el valor en el momento t de la serie temporal la cual está relacionada con un estado latente llamado μ_t y finalmente el componente irregular que también es llamado ruido o ε_t . Por otro lado, la ecuación de transición está definida mediante la ecuación (2), donde: $\eta_t \sim N(0, \sigma^2)$.

$$\mu_{t+1} = \mu_t + \eta_t \quad (2)$$

Un modelo que pueda escribirse mediante estas dos ecuaciones (observación y transición) se puede transformar en un modelo básico estructural con tres componentes de estado, una tendencia μ_t , un patrón estacional τ_t y un componente de regresión $\beta^T x_t$. En este componente se encuentran las covariables socioeconómicas que se desean incluir en el modelo, según las ecuaciones (3) a (6).

$$y_t = \mu_t + \tau_t + \beta^T x_t + \varepsilon_t \quad (3)$$

$$\mu_t = \mu_{t-1} + \delta_{t-1} + \eta_t \quad (4)$$

$$\delta_t = \delta_{t-1} + w_t \quad (5)$$

$$\tau_t = -\sum_{s=1}^{s-1} \tau_{t-s} + \gamma_t \quad (6)$$

Donde las variables ε , η , w y γ son variables aleatorias normales con varianza constante respecto a todo el tiempo T pero diferente entre sí; por otro lado:

- τ : Se encuentra el componente aleatorio S el cual no es más que el número de estaciones.
- δ_t : Representa una caminata aleatoria la cual determina la tendencia de los datos.
- μ_t : Representa la tendencia actual, μ_t se ve afectada por $\mu_{t-1} + \delta_{t-1}$ más el ruido generado por η_t .
- x_t : Es el vector de covariables socioeconómicas, representa las demás series de tiempo que ayudan a tener una mejor estimación para y .

5.2 Datos

Para la presente investigación se dispone una serie temporal de datos aeronáuticos desde el mes de enero de 1992 hasta el mes de diciembre de 2021 (pasajeros nacionales e internacionales, y carga aérea nacional e internacional del sistema de transporte aéreo colombiano en conjunto (58 aeropuertos abiertos al tráfico aéreo comercial), datos generados por la autoridad pública aeronáutica de Colombia [66]. Por otro lado, también se dispone de un conjunto de variables socioeconómicas (a nivel nacional del país-caso de estudio), a saber: PIB, PIB per cápita, Población, Índice Producción Industrial IPI, Índice de Precios al Consumidor IPC, Tasa Representativa del Mercado TRM, Inversión Extranjera Directa IED, Exportaciones, Importaciones, Índice Gini, y Tasa de Desempleo, todas ellas para todo el periodo de estudio (1992-2021), obtenidas de la agencia pública estadística de Colombia [68].

Debido a la pandemia del Covid-19, en 2020 se presentaron severas restricciones en el tráfico aéreo comercial, en especial de pasajeros (ya que la caída del transporte de carga aérea fue de solo un 16% con respecto al 2019 [66], lo que generó un cambio inesperado en el comportamiento habitual de las series mencionadas, por lo que se realizó un análisis de intervención para los meses de abril a octubre (2020) en la serie de pasajeros nacionales y para los meses de marzo a octubre (2020) en la serie de pasajeros internacionales. Dicho análisis de intervención consiste en un impulso compensado el cual capta cambios transitorios de nivel [69].

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para los modelos BSTS propuestos se encuentra que presentan un error porcentual absoluto medio MAPE, el cual mide el tamaño del error (absoluto) en términos porcentuales, por debajo del 10 %. El hecho de que se estime la magnitud del error porcentual, lo convierte en un indicador utilizado frecuentemente por los desarrolladores de pronósticos debido a su interpretación fácil. Un pequeño valor de MAPE indica que los pronósticos tienen una mayor probabilidad de ser precisos [70].

En términos generales, el uso de covariables socioeconómicas se presenta de acuerdo a la relación que estas pueden presentar desde el punto de vista económico y como podrían influir / impactar en el cálculo del pronóstico de cada una de las variables de transporte aéreo a predecir [71-74], sin embargo, los efectos de la pandemia del Covid-19 (en especial en 2020) sobre todas las variables socioeconómicas (al ser incluidos como covariables en los modelos) no muestran un efecto positivo sobre las tendencias de recuperación que ha tenido el transporte aéreo lo cual se evidencia al presentar un menor MAPE respecto a los modelos que no incluyen dichas covariables.

Por lo anterior el uso del modelo BSTS sin covariables es la mejor alternativa de predicción para el periodo de tiempo analizado. Además, dado el comportamiento estructural de las variables pasajeros nacionales e internacionales y carga nacional e internacional se evidenció que presentan una estructura repetitiva o estacional cada 12 meses, por lo cual en el modelo BSTS se debe incluir este componente cuando se realiza la estimación del pronóstico.

Para el caso de la demanda de pasajeros nacionales (o domésticos) en el modelo BSTS, para hacer un muestreo a partir de la distribución posterior se emplea el algoritmo MCMC [51, 75] con 1000 iteraciones, con un componente estacional de orden 12 se obtuvo un MAPE de 4,69%, obteniendo que la demanda estimada o proyectada de pasajeros domésticos para el año 2031 será de 54,4 millones (Figura 1).

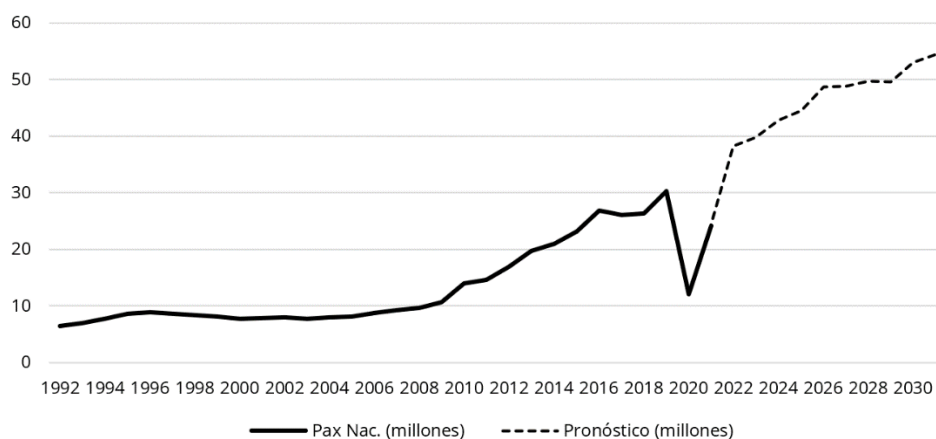


Figura 1. Histórico de tráfico (1992-2021) y pronóstico (2022-2031) de la demanda de pasajeros nacionales (o domésticos)

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los MAPE de los modelos BSTS para el pronóstico de la variable pasajeros nacionales sin covariable e incluyendo tres covariables (socioeconómicas) individualmente. Los resultados muestran que el segundo mejor modelo se consiguió con la variable IPC, modelo en el cual su mejor MAPE (8,10%) se encontró usando 1000 iteraciones y un componente estacional de orden 12, siguiendo el orden el siguiente modelo se encontró con la variable TRM, modelo en el cual su mejor MAPE (11,19%) se encontró usando 10000 iteraciones y un componente estacional de orden 12 y por último, el modelo con la variable Tasa de Desempleo, modelo en el cual su mejor MAPE (12,95%) se encontró usando 10000 iteraciones y un componente estacional de orden 12.

Tabla 1. Comparación de los MAPE para los modelos con covariables (socioeconómicas) para la demanda de pasajeros nacionales (o domésticos)

Modelo	Variable y Covariable	MAPE
Modelo 1	Pax Nac. (sin covariables)	4,69%
Modelo 2	Pax Nac. (con IPC)	8,10%
Modelo 3	Pax Nac. (con TRM)	11,19%
Modelo 4	Pax Nac. (con Tasa de Desempleo)	12,95%

Para el caso de la demanda de pasajeros internacionales en el modelo BSTS, para hacer un muestreo a partir de la distribución posterior se emplea el algoritmo MCMC con 1000 iteraciones, con un componente estacional de orden 12 se obtuvo un MAPE de 7,4%, obteniendo que la demanda esperada de pasajeros internacionales para el año 2031 será de 22,2 millones (Figura 2).

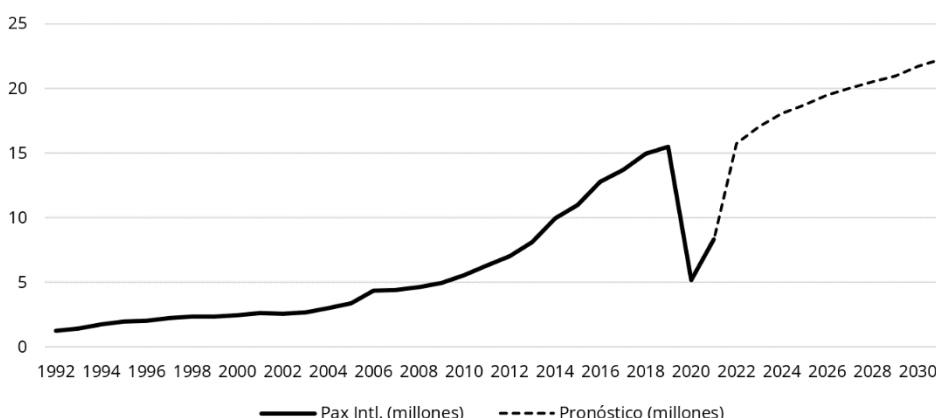


Figura 2. Histórico de tráfico anual (1992-2021) y pronóstico (2022-2031) de la demanda de pasajeros internacionales

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los MAPE de los modelos BSTS para el pronóstico de la variable pasajero internacional sin covariable e incluyendo tres covariables (socioeconómicas) individualmente.

Los resultados muestran que el segundo mejor modelo se consiguió con la variable TRM, modelo en el cual su mejor MAPE (8,75%) se encontró usando 10000 iteraciones y un componente estacional de orden 12,

siguiendo el orden el siguiente modelo se encontró con la variable IPC, modelo en el cual su mejor MAPE (9,42%) se encontró usando 5000 iteraciones y un componente estacional de orden 12 y, por último, el modelo con la Tasa de Desempleo, modelo en el cual su mejor MAPE (10,42%) se encontró usando 1000 iteraciones y un componente estacional de orden 12.

Tabla 2. Comparación de los MAPE para los modelos con covariables para la demanda de pasajeros internacionales

Modelo	Variable y Covariable	MAPE
Modelo 1	Pax Intl. (sin covariables)	7,41%
Modelo 2	Pax Intl. (con TRM)	8,75%
Modelo 3	Pax Intl. (con IPC)	9,42%
Modelo 4	Pax Intl. (con Tasa de Desempleo)	10,42%

Para el caso de la demanda de carga nacional en el modelo BSTS, para hacer un muestreo a partir de la distribución posterior se emplea el algoritmo MCMC con 2000 iteraciones, con un componente estacional de orden 24 se obtuvo un MAPE de 1,3%, obteniendo que la demanda esperada de transporte de carga aérea nacional (o doméstica) para el año 2031 será de 318.000 Tn (Figura 3).

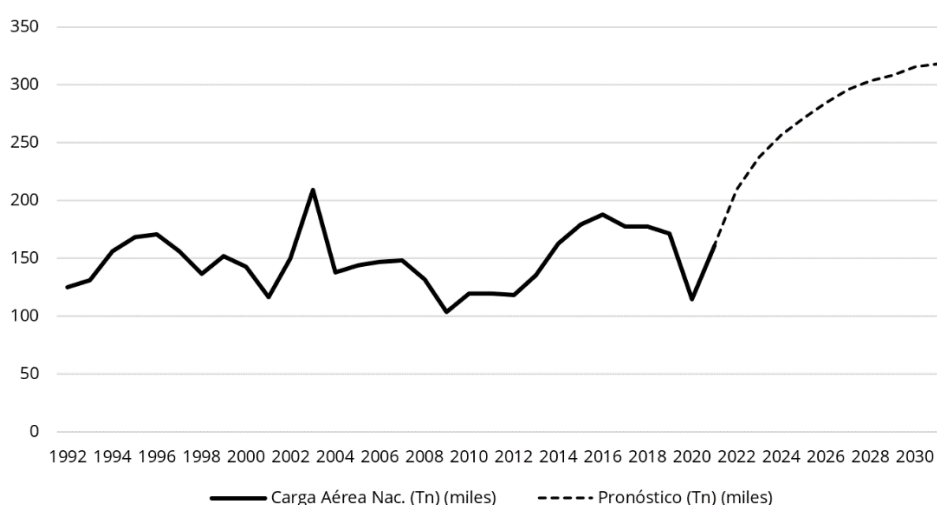


Figura 3. Histórico de tráfico (1992-2021) y pronóstico (2022-2031) de la demanda de transporte de carga aérea nacional

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los MAPE de los modelos BSTS para el pronóstico de la variable carga nacional sin covariable e incluyendo cuatro covariables (socioeconómicas) individualmente. Los resultados muestran que el segundo mejor modelo se consiguió con la variable TRM, modelo en el cual su mejor MAPE (6,48%) se encontró usando 2000 iteraciones y un componente estacional de orden 12.

El siguiente mejor modelo se encontró con la variable Importaciones, modelo en el cual su mejor MAPE (6,48%) se encontró usando 10000 iteraciones y un componente estacional de orden 12, y el último modelo es con la variable Exportaciones, en el cual su mejor MAPE (8,31%) se encontró usando 2000 iteraciones y un componente estacional de orden 12.

Tabla 3. Comparación de los MAPE para los modelos con covariables (socioeconómicas) para la demanda de transporte de carga aérea nacional

Modelo	Variable y Covariable	MAPE
Modelo 1	Carga Aérea Nac. (sin covariables)	1,31%
Modelo 2	Carga Aérea Nac. (con TRM)	6,48%
Modelo 3	Carga Aérea Nac. (con Importaciones)	8,07%
Modelo 4	Carga Aérea Nac. (con Exportaciones)	8,31%

Para el caso de la demanda de carga internacional en el modelo BSTS, para hacer un muestreo a partir de la distribución posterior se emplea el algoritmo MCMC con 5000 iteraciones, con un componente estacional de orden 12 obtuvo un MAPE de 2,21%, obteniendo que la demanda esperada de transporte de carga aérea internacional para el año 2031 será de 769.700 Tn (Figura 4).

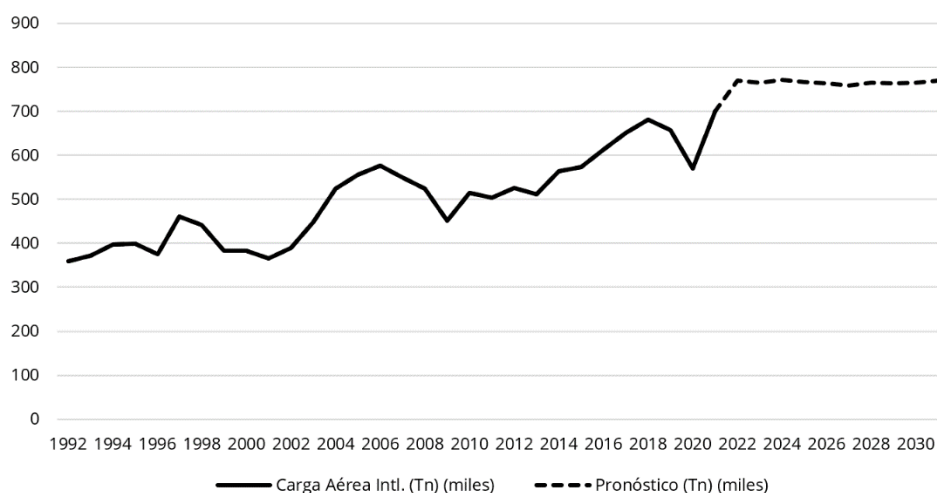


Figura 4. Histórico de tráfico anual (1992-2021) y pronóstico (2022-2031) de la demanda de transporte de carga aérea internacional

En la Tabla 4 se presentan los resultados de los MAPE de los modelos BSTS para el pronóstico de la variable demanda de carga aérea nacional sin covariable e incluyendo cuatro covariables (socioeconómicas) individualmente. Los resultados muestran que el segundo mejor modelo se consiguió con la variable TRM, modelo en el cual su mejor MAPE (4,08%) se encontró usando 5000 iteraciones y un componente estacional de orden 12, siguiendo el orden el siguiente modelo se encontró con la variable Exportaciones, modelo en el cual su mejor MAPE (7,98%) se encontró usando 20000 iteraciones y un componente estacional de orden 12 y por último, el modelo con la variable Importaciones generó un MAPE de 11,95% y se consiguió usando 1000 iteraciones y un componente estacional de orden 12.

Tabla 4. Comparación de los MAPE para los modelos con covariables (socioeconómicas) para la demanda de transporte de carga aérea internacional

Modelo	Variable y Covariable	MAPE
Modelo 1	Carga Aérea Intl. (sin covariables)	2,21%
Modelo 2	Carga Aérea Intl. (con TRM)	4,08%
Modelo 3	Carga Aérea Intl. (con Exportaciones)	7,987%
Modelo 4	Carga Aérea Intl. (con Importaciones)	11,95%

Finalmente, cabe mencionar que los resultados aquí obtenidos coinciden con los pronósticos realizados en un estudio reciente [76], sobre la recuperación del transporte aéreo a nivel mundial, el cual predice que la demanda de pasajeros aéreos se recuperará, a niveles de pre pandemia, a finales del 2022 (escenario optimista). Los resultados también coinciden con estudios y proyecciones muy recientes de las tres grandes organizaciones del transporte aéreo internacional.

Por ejemplo, IATA [77] estima una recuperación tanto del valor absoluto de la demanda de pasajeros como la tendencia de crecimiento (a índice pre pandémico) para 2023 para la región de América Latina & Caribe (LA&C), donde se encuentra el país-caso de estudio de la presente investigación); ICAO [78] presenta proyecciones similares de demanda de pasajeros para LA&C, aunque la tendencia de crecimiento de la demanda a valores de 2019 se sitúan a finales del 2022; y finalmente ACI [79] predice que la demanda de pasajeros, a nivel mundial, recuperará los valores del 2019 a finales de 2023, para pasajeros domésticos, y a mediados de 2024 para pasajeros internacionales.

7. CONCLUSIONES

En primer lugar, estimar la demanda de transporte aéreo (pasajeros y carga) a nivel local/nacional, aporta valiosa información para que los planificadores de la aviación civil puedan diseñar, planificar e implementar, con suficiente antelación: estrategias de desarrollo de las infraestructuras aéreas; un calendario de inversión de capital (público o privado); y finalmente, políticas públicas relacionadas que permitan a los tomadores de decisión (públicos) contribuir a consolidar y reforzar el desarrollo de la industria del transporte aéreo local/nacional. En segundo lugar, tanto la academia como la industria, y a nivel mundial,

están desarrollando investigaciones y estudios de pronósticos que les permita saber cuándo y cómo se recuperará el tráfico aéreo (tanto el volumen de la demanda como la tendencia de crecimiento) a niveles pre pandémicos (2019), debido a la importancia de la industria de la aviación, no solo en lo que se refiere a la conectividad local/regional/mundial, sino también a su contribución a la economía mundial.

En lo que refiere a la metodología utilizada en la presente investigación, y los resultados obtenidos, se puede destacar que los pronósticos van en línea con el comportamiento de las series de pasajeros y de carga aérea post pandemia, mostrando el crecimiento a futuro que presenta el sector aeronáutico. Además, se evidencia que el uso de los modelos BSTS sin covariables y con covariables presentan resultados aceptables en el pronóstico, los cuales fueron justificados con el MAPE mostrando valores por debajo del 10% de error, también son modelos que presentan robustez a la hora de modelar series que han tenido choques en su estructura como la que se presentó por la emergencia sanitaria del Covid-19 a nivel mundial y que llevó los valores de las series a niveles mínimos para después empezar a regresar a su estado habitual.

El uso de los modelos bayesianos abre la posibilidad de trabajar con pronósticos de series aeronáuticas a largo plazo, presentando una ventaja respecto a los modelos clásicos de series de tiempo que convergen a la media en el largo plazo además de no asimilar los cambios en la estructura de la serie como si lo hacen los modelos presentados.

REFERENCIAS

- [1] TRB. (2002). Aviation Demand Forecast: Survey of Methodologies. Transportation Research Board.
- [2] Horonjeff R. et al. (2010). Planning and Design of Airports. McGraw-Hill.
- [3] Wells A. y Young S. (2004). Airport Planning & Management. McGraw-Hill.
- [4] Ashford N. et al. (2011). Airport Engineering. John Wiley & Sons.
- [5] Janic M. (2021). System Analysis and Modelling in Air Transport. CRC Press.
- [6] Janic M. (2009). Airport analysis, planning and design: demand, capacity and congestion. Nova Science Publishers.
- [7] ICAO. (1987). Master Planning. Part 1. Doc 9184. ICAO.
- [8] Rodríguez Y. et al. (2020). Air traffic forecast in post-liberalization context: a Dynamic Linear Models approach. *Aviation* 24(1), 10-19.
- [9] García M. (2013). Aeropuertos. Planificación, Diseño y Medio Ambiente. Ibergarceta Publicaciones.
- [10] ICAO. (2006). Manual on Air Traffic Forecasting. Doc 8991. ICAO.
- [11] ACI. (2016). Traffic Forecast. ACI (Airports Council International).
- [12] Kazda A. y Caves R. (2015). Airport design and operations. Emerald.
- [13] de Neufville R. y Odoni A. (2013). Airport Systems, Planning, Design, and Management. McGraw-Hill.
- [14] Jalali P. y Rabotyagov S. (2020). Quantifying cumulative effectiveness of green stormwater infrastructure in improving water quality. *Science of the Total Environment* 731, 138953.
- [15] Baier F. et al. (2021). Global cargo gravitation model: airports matter for forecasts. *International Economics and Economic Policy*.
- [16] Dantas T. et al. (2017). Air transportation demand forecast through Bagging Holt Winters methods. *Journal of Air Transport Management* 59, 116-123.
- [17] Abed S. et al. (2001). An econometric analysis of international air travel demand in Saudi Arabia. *Journal of Air Transport Management* 7, 143-148.
- [18] Fernandes E. y Pacheco, R. (2010). The causal relationship between GDP and domestic air passenger traffic in Brazil. *Transportation Planning and Technology* 33, 569-581.
- [19] Garrow L. y Koppelman F. (2004). Predicting air travelers' no-show and standby behavior using passenger and directional itinerary information. *Journal of Air Transport Management* 10, 401-411.
- [20] Grosche T. et al. (2007). Gravity models for airline passenger volume estimation. *Journal of Air Transport Management* 13, 175-183.
- [21] Samagaio A. y Wolters M. (2010). Comparative analysis of government forecasts for the Lisbon Airport. *Journal of Air Transport Management* 16, 213-217.
- [22] Chin A. y Tay J. (2001). Developments in air transport: implications on investment decisions, profitability and survival of Asian airlines. *Journal of Air Transport Management* 7, 319-330.
- [23] Tsui W. et al. (2014). Forecasting of Hong Kong airport's passenger throughput. *Tourism Management* 42, 62-76.
- [24] Aston J. y Koopman S. (2006). A Non-Gaussian Generalization of the Airline Model for Robust Seasonal Adjustment. *Journal of Forecasting* 25, 325-349.
- [25] West M. y Harrison J. (2006). Bayesian forecasting and dynamic models. Springer Science & Business Media.
- [26] Honjo K. et al. (2018). Dynamic linear modeling of monthly electricity demand in Japan: Time variation of electricity conservation effect. *PloS ONE* 13(4), e0196331.

- [27] Petris G. (2009). *Dynamic linear models with R*. Springer.
- [28] Tascón D. y Díaz O. (2021). Air traffic forecast and its impact on runway capacity. A System Dynamics approach. *Journal of Air Transport Management* 90, 1-10.
- [29] Suryani E. et al. (2012). Dynamic simulation model of air cargo demand forecast and terminal capacity planning. *Simulation Modelling Practice and Theory* 28, 27-41.
- [30] Suryani E. et al. (2010). Air passenger demand forecasting and passenger terminal capacity expansion: A system dynamics framework. *Expert Systems with Applications* 37, 2324-2339.
- [31] Zhang G. et al. (1998). Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. *International Journal of Forecasting* 14, 35-62.
- [32] Srisaeng P. et al. (2015). Using an artificial neural network approach to forecast Australia's domestic passenger air travel demand. *World Review of Intermodal Transportation Research* 5(3), 281-313.
- [33] Mostafaeipour A. et al. (2018). Prediction of air travel demand using a hybrid artificial neural network (ANN) with Bat and Firefly algorithms: a case study. *The Journal of Supercomputing* 74(10), 5461-5484.
- [34] Gupta V. et al. (2019). Airlines passenger forecasting using LSTM based recurrent neural networks. *International Journal Information Theories and Applications* 26(2), 178-187.
- [35] Dingari et al. (2019). Air Traffic Forecasting Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Scientific & Technology Research* 8(10), 556-559.
- [36] Bao Y. et al. (2012). Forecasting Air Passenger Traffic by Support Vector Machines with Ensemble Empirical Mode Decomposition and Slope-Based Method. *Discrete Dynamics in Nature and Society* ID 431512, 1-12.
- [37] Vieira J. et al. (2022). The impact of COVID-19 on air passenger demand and CO2 emissions in Brazil. *Energy Policy* 164, 112906.
- [38] Al-Sultan A. et al. (2021). Forecasting air passenger traffic volume: evaluating time series models in long-term forecasting of Kuwait air passenger data. *Advances and Applications in Statistics* 70 (1), 69-89.
- [39] Madhavan M. et al. (2020). Short-term forecasting for airline industry: the case of indian air passenger and air cargo. *Global Business Review* 5, 1-35.
- [40] Kalman R. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering* 82, 35-45.
- [41] Jones R. (2019). *Longitudinal Data with Serial Correlation: A state-space approach*. Chapman & Hall / CRC Press.
- [42] Hamilton D. (1994). *Time Series Analysis*. Princeton University Press.
- [43] Koller D. y Friedman N. (2009). *Probabilistic Graphical Models*. MIT Press.
- [44] Scott S. y Varian H. (2014). Predicting the present with Bayesian structural time series. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation* 5(1-2), 4-23.
- [45] Scott S. y Varian H. (2015). Bayesian Variable Selection for Nowcasting Economic Time Series. *NBER Chapters*, En: *Economic Analysis of the Digital Economy*, 119-135. National Bureau of Economic Research.
- [46] Brodersen K. et al. (2015). Inferring causal impact using Bayesian structural time-series models. *The Annals of Applied Statistics* 9, 247-274.
- [47] Peters J. et al. (2017). *Elements of Causal Inference: Foundations and Learning Algorithms*. MIT Press.
- [48] Petris, G. et al. (2009). *Dynamic linear models*. Springer.
- [49] Durbin J. y Koopman S. (2002). A simple and efficient simulation smoother for state space time series analysis. *Biometrika* 89, 603-615.
- [50] George E. y McCulloch R. (1997). Approaches for Bayesian Variable Selection. *Statistica Sinica* 7, 339-373.
- [51] Hoeting J. et al. (1999). Bayesian Model Averaging: A Tutorial. *Statistical Science* 14(4), 382-417.
- [52] Bach S. et al. (2013). Hinge-loss Markov Random Fields: Convex Inference for Structured Prediction. Recuperado: arXiv:1309.6813.
- [53] Harvey A. et al. (2007). Trends and Cycles in Economic Time Series: A Bayesian Approach. *Journal of Econometrics* 140, 618-649.
- [54] Griffiths W. (2003). *Bayesian Inference in the Seemingly Unrelated Regressions Model*. Computer-aided econometrics. CRC Press.
- [55] Santana L. (2019). Nowcasting with Google Trends: Dynamics of the Monthly Economic Activity, Private Consumption and Investment based on Google Trends Data and a Bayesian Structural Time Series Model. En XIII Foro de Investigadores de Bancos Centrales del Consejo Monetario Centroamericano. Guatemala, Guatemala.
- [56] Zhang Y. y Fricker J. (2021). Quantifying the Impact of COVID-19 on Non-Motorized Transportation: A Bayesian Structural Time Series Model. *Transport Policy* 103, 11-20.
- [57] Cerri J. et al. (2022). Blacklists do not necessarily make people curious about invasive alien species. A case study with Bayesian structural time series and Wikipedia searches about invasive mammals in Italy. *NeoBiota* 71, 113-128.
- [58] Giri S. et al. (2020). Prediction of Monthly Hilsa (*Tenualosa ilisha*) Catch in the Northern Bay of Bengal using Bayesian Structural Time Series Model. *Regional Studies in Marine Science* 39, 101456.
- [59] ACI. (2021). *Annual World Airport Traffic Report*. ACI (Airports Council International).
- [60] IATA. (2021). *World Air Transport Statistics 2021*. IATA.

- [61] Díaz O. (2021). Contribución del transporte aéreo a la conectividad territorial. El caso de Colombia. *EURE* 47(140), 117-141.
- [62] Díaz O. y Ávila J. (2015). Evolution of the airport and air transport industry in Colombia and its impact on the economy. *Journal of Airline and Airport Management* 5(1), 39-66.
- [63] Díaz O. y Pulido L. (2019). Measurement of airport efficiency. The case of Colombia. *Transport and Telecommunication* 20(1), 40-51
- [64] Díaz O. y Zea J. (2018). Influence of the liberalization of the air transport industry on configuration of the traffic in the airport network. *Transportation Research Procedia* 33, 43-50.
- [65] Díaz O. (2021). The role of regional airports in connectivity and regional development. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 49(4), 1-13.
- [66] Aerocivil (2022). Estadísticas aeronáuticas. Recuperado: <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/boletines-operacionales>
- [67] Díaz O. y Alonso C. (2021). Impact of airport policies on regional development. Evidence from the Colombian case. *Regional Science Policy & Practice*, 1-26.
- [68] DANE. (2022). Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Colombia.
- [69] Box G. y Tiao G. (1975). Intervention analysis with applications to economic and environmental problems. *Journal of the American Statistical Association* 70, 70-79.
- [70] Ren L. y Glasure Y. (2009). Applicability of the revised mean absolute percentage errors (mape) approach to some popular normal and non-normal independent time series. *Inter. Advances in Economic Research* 15, 409-420.
- [71] Rodríguez M. et al. (2015). La causalidad entre el crecimiento económico y la expansión del transporte aéreo: un análisis empírico para Chile. *Revista de Economía del Rosario* 18(1), 127-144.
- [72] Navarro S. y Acuña J. (2021). Determination of the average daily annual traffic growth rates in Nicaragua based on macroeconomic data. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo* 11(2), 70-83.
- [73] Kiracı K. y Battal, U. (2018). Macroeconomic Determinants of Air Transportation: A VAR Analysis on Turkey. *Gaziantep University Journal of Social Sciences* 17(4), 1536-1557.
- [74] Adenigbo A. et al. (2022). Macroeconomic Determinants of Air Cargo Flows in Ghana. *Latin American Journal of Trade Policy* 5(12), 7-36.
- [75] Madigan D. y Raftery A. E. (1994). Model selection and accounting for model uncertainty in graphical models using Occam's window. *Journal of the American Statistical Association* 89(428), 1535-1546.
- [76] Gudmundsson S. et al. (2021). Forecasting temporal world recovery in air transport markets in the presence of large economic shocks: The case of Covid-19. *Journal of Air Transport Management* 91, 102007.
- [77] IATA. (2022). Global Outlook for Air Transport. IATA.
- [78] ICAO. (2022). Effects of Novel Coronavirus (COVID 19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis. ICAO.
- [79] ACI. (2022). The impact of COVID-19 on airports - and the path to recovery. ACI World.

Generación de energía eléctrica a partir de cerámicos y fluoruro de polivinilideno PVDF

Eliecer Yépez Sánchez¹

Franklin Armando Bermeo Acosta²

¹ *Universidad de San Buenaventura*

² *Universidad Santiago de Cali*
Colombia

En zonas rurales de baja radiación solar y alta lluvia, donde no es posible que la acometida eléctrica sea una opción, una alternativa es el uso de materiales piezoeléctricos PVDF (fluoruro de polivinilideno) y piezoeléctricos cerámicos, como insumos que puedan ser utilizados en la conversión de la energía mecánica de la lluvia en energía eléctrica. Se explora teóricamente las prácticas realizadas en otras investigaciones similares para medir la eficiencia de estos materiales. Asimismo, se realiza una búsqueda en la literatura científica que investigan este tipo de materiales, para diseñar dos dispositivos capaces de analizar la respuesta de los piezoeléctricos analizando los datos obtenidos, permitiendo considerar la viabilidad de utilizar los materiales piezoeléctricos que puedan ubicarse sobre los techos de las viviendas, lo mismo que en parques de las regiones que presentan un déficit de Cobertura de Energía Eléctrica CEE y una precipitación pluvial regular la mayor parte del año y, en general, diversas superficies que estén expuestas a la acción directa de la lluvia. Los resultados experimentales muestran dos opciones de uso: los piezoeléctricos cerámicos y los materiales PVDF; para ambos casos el arreglo más apropiado se obtiene conectando los dispositivos piezoeléctricos en serie, ya que brindan mayor potencia.

¹ Licenciado en Matemáticas y Magíster en Ciencias Naturales y Matemáticas

Contacto: eliecer.yepesz00@usc.edu.co

² Físico, Magíster Física y Doctor en Ingeniería

Contacto: fbermeoa@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Colombia posee una producción de energía diversificada, entre carbón, petróleo crudo, gas natural, hidroeléctrico, biocombustible y desechos, solar y eólica; de los cuales el 93,9% de la producción corresponde a fuentes no renovables, la electricidad es obtenida principalmente de las hidroeléctricas, seguido del gas natural y en formas casi despreciables en términos de porcentaje, por biocombustibles y desechos, solar y eólica. En cuanto al consumo, el 39,8% corresponde al sector transporte, el 26,4% a la industria, el 16,3% al sector residencial y el restante 17,5% corresponde al sector comercial y otros [1].

Por otra parte, el consumo energético derivado de la electricidad, tiene su mayor demanda en el sector industrial. Su mayor consumo es utilizado para bombear y/o comprimir líquidos y en general para el funcionamiento de motores 76%, seguido del calor directo 9%, utilizado para el moldeo de metales. Asimismo, la refrigeración, iluminación y aire acondicionado, representan solo el 13% del consumo eléctrico en este sector [1].

Por consiguiente, la poca producción de energía mediante fuentes renovables, trae alteraciones en los ecosistemas, pues se debe recurrir a producir electricidad de manera no renovable [1]. Un informe de *Greenpeace* de enero de 2012 [2], señala que los mayores desastres ambientales derivan de las descargas de petróleo crudo en los ecosistemas, relatan que esto ocurre también de manera intencional, por ejemplo, en las descargas operacionales de barcos [2]. Sumado a esto, desastres ambientales como el presentado en un pozo petrolero ubicado en La fortuna, Norte de Santander [3]; requiere generar nuevos métodos de obtención de electricidad y de esta manera encontrar una menor dependencia de los combustibles fósiles. Otra dificultad en materia energética, recae en la interconexión eléctrica de sus poblaciones, aunque la cobertura ha aumentado, pues se pasó de tener interconexiones eléctricas en menos de la mitad del territorio [4], a tener interconectado el 97.02% del territorio nacional.

En los suelos desarrollados sobre margas se obtuvieron mejores relaciones entre la energía cinética de la lluvia y los cambios en las propiedades físicas y superficiales del suelo que en los suelos desarrollados sobre coluvios calizos. En los primeros se observó un incremento de la densidad aparente y disminución de la conductividad hidráulica saturada del suelo con el aumento de la precipitación y de la energía cinética. [5]. Esta investigación centra su atención, en identificar los estudios científicos realizados a materiales piezoeléctricos, en el sentido de producir electricidad a través de su deformación; para mostrar teóricamente la posibilidad de ser usado para la obtención de energía renovable que pueda ser presentada como alternativa para aquellas regiones apartadas geográficamente de las redes eléctricas interconectadas en Colombia (déficit de CEE), contribuir a reducir las emisiones de CO₂.

Finalmente, en el siguiente proyecto se realiza una investigación sobre la obtención de energía eléctrica a partir de la energía mecánica presente en la lluvia y si existen en la actualidad sistemas de conversión de energía mecánica a energía eléctrica por medio de piezoeléctricos, independiente de si están o no relacionados con el fenómeno de la lluvia. Una vez establecida esta información se realiza un análisis de los resultados para determinar cómo se comportan los materiales piezoeléctricos al ser utilizados en la obtención de energía potencial eléctrica a partir de la energía mecánica presente en las gotas de lluvia.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Los piezoeléctricos

Con el transcurrir del tiempo aparecen nuevas formas de aprovechar la lluvia en el proceso de obtener energía eléctrica, se suma a esta investigación una técnica de generación de energía eléctrica llamada ECOPAD, esta tecnología puesta a disposición del mundo en 2011, fue premiada en el marco de los premios de diseño Fujitsu, los cuales se entregan a la innovación en materia de energías ecológicas [5].

Los materiales piezoeléctricos, pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. [7]. explican que cuando un material piezoeléctrico, es sometido a una tensión eléctrica, su estructura molecular se alinea, y esta alineación es proporcional al voltaje suministrado, ello conlleva a un

cambio en sus dimensiones, el equivalente a una dilatación [6]. Cuando el cuarzo se estira o se comprime, las cargas positivas y las negativas se reagrupan en lados opuestos del cristal, y al unir esta diferencia de potencial mediante un circuito, se puede obtener una corriente eléctrica [8] (Figura 1).

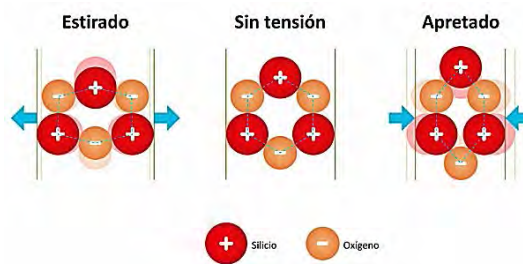


Figura 1. Composición de un átomo de cuarzo sometido a una presión

Las aplicaciones de estos materiales piezoeléctricos continúan en aumento, y en la actualidad se puede obtener material piezoeléctrico modificado en su estructura molecular. Esto lo dio a conocer la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales en su revista Superficies y Vacío en 2010; en esta publicación explican como el PVDF (Fluoruro de polivinilideno) al ser colocado en medio de dos placas de cobre puede convertir (de una manera similar al cuarzo) la presión (energía mecánica) en energía eléctrica [9], ilustrado en la Figura 2.

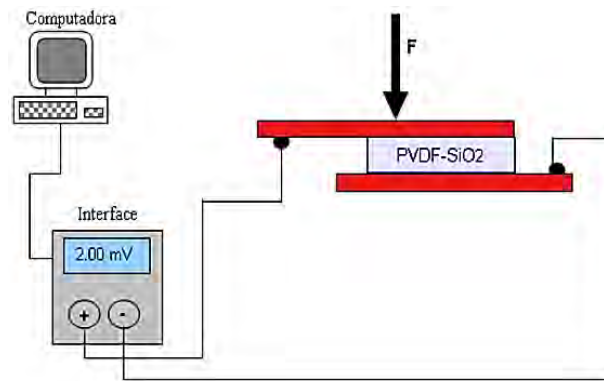


Figura 2. Diagrama esquemático de un sensor piezoeléctrico [9]

2.2 Particularidades de la lluvia

Se calcula ahora la masa aproximada de una gota de lluvia, representada pictóricamente en la Figura 3, La masa de un cuerpo es la proporción directa que existe entre su densidad y su volumen: $\rho * vm$

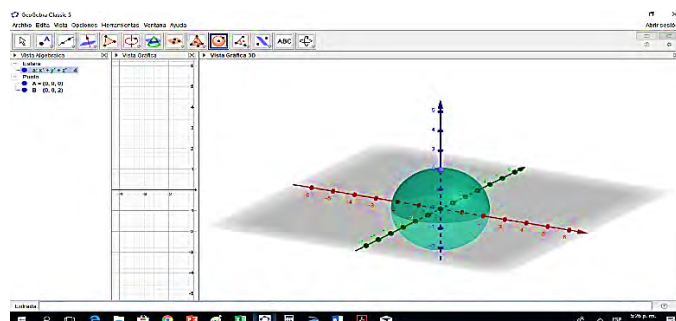


Figura 3. Gota de agua sin rozamiento con el viento

Las gotas no tienen forma alargada, son esféricas, Si se asume un diámetro de 3mm para una gota de agua, su volumen lo da la ecuación (1), y la masa de una gota de lluvia está dada por la ecuación (2).

$$v = \frac{4}{3}\pi(0,15 \text{ cm})^3 = 0,0141\text{cm}^3 \quad (1)$$

$$m = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * (0,0141\text{cm}^3) = 0,0141\text{g} \quad (2)$$

Es posible ahora, conocer la energía aproximada, despreciando la energía perdida en el rozamiento con el viento, de una gota de lluvia realizando el siguiente cálculo, como la energía mecánica se calcula con ecuación (3).

$$E_m = K + U \quad (3)$$

Si se hace la energía potencial (U) igual a cero, esto es, el instante t_a cuando la gota de lluvia golpea el suelo, por tanto, no posee altura de acuerdo al sistema de referencia, la energía mecánica (E_m) será igual a su energía cinética (K), utilizando la velocidad media de la lluvia se obtiene la ecuación (4).

$$E_m = \frac{1}{2} (1,41 \times 10^{-5} \text{ kg}) (5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 3,525 \times 10^{-4} \text{ Julios} \quad (4)$$

Esta cantidad de energía hace referencia a solo una gota de lluvia con una velocidad mediana, lo que indica que dicho valor es totalmente aproximado y no se considera constante en la investigación. La precipitación de la lluvia se mide en áreas de 1m^2 (superficie plana), utilizando un instrumento de medida llamado pluviómetro, existen de diversos tipos que permiten clasificar la lluvia dentro de unos parámetros [10]: intensidad, duración, altura o profundidad (de un terreno anegado), frecuencia, distribución temporal, distribución espacial. En la Tabla 1 se clasifica la lluvia según su precipitación.

Tabla 1. Clasificación de la precipitación según la intensidad [10]

Clase	Intensidad media en una hora (mm/h)
Débiles	≤ 2
Moderadas	$> 2 \text{ y } \leq 15$
Fuertes	$>15 \text{ y } \leq 30$
Muy fuertes	$>30 \text{ y } \leq 60$
Torrenciales	>60

Existe otra manera de clasificar las lluvias, como se muestra en la Tabla 2, de acuerdo al índice de regularidad de la intensidad (n), esta mide la relación entre la intensidad y la duración de la precipitación.

Tabla 2. Clasificación de la precipitación según la regularidad [10]

n	Variabilidad de la intensidad
0,00-0,20	Prácticamente constante
0,20-0,40	Débilmente variable
0,40-0,60	Variable
0,60-0,80	Moderadamente variable
0,80-1,00	Fuertemente variable

La lluvia se mide relacionando la caída de agua en un área de 1m^2 . Si se vierte un litro de agua en un área de 1m^2 , esta alcanzará una profundidad de 1mm . Por esta razón, dado que se tomó el volumen de una gota de agua como $0,0141\text{cm}^3$ y relacionado con el número de gotas que caen por metro cuadrado, es posible determinar una medida aproximada de los Julios obtenidos en esta precipitación por metro cuadrado. La cantidad de gotas (g_n) se obtiene de dividir el volumen ocupado (V_t) entre el volumen de una gota de agua (V_g), entonces se necesitarán 70922 gotas de lluvia para completar este volumen, según la ecuación (5).

$$g_n = \frac{V_t}{V_g} = \frac{1000 \text{ cm}^3}{0,0141 \text{ cm}^3} \approx 70922 \text{ g} \quad (5)$$

Entonces su energía cinética se obtendrá, del producto entre la energía cinética de cada gota multiplicada por el número de gotas que componen el volumen, lo da la ecuación (6). La potencia que suministre la lluvia en el piezoeléctrico, es directamente proporcional al tiempo que dure la precipitación.

$$E_c = (3,525 \times 10^{-4} \text{ Julios}) (70922) \approx 25 \text{ Julios} \quad (6)$$

Los electrodomésticos que pueden funcionar con esta capacidad, según las Empresas Públicas de Medellín EPM son: bombillo ahorrador de 25 w; bombillo ahorrador de 15 w: 15w; bombillo led: 7w; instalación

navideña de 100 luces led: 9w; grabadora: 14w; radio: 10w; radio reloj digital: 2w; cargador con celular conectado: 12w; cargador sin celular conectado: 5w; afeitadora eléctrica: 15w [11].

2.3 Análisis de los piezoeléctricos

2.3.1 Efecto piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos, Smart materials o multifunctional materials son aquellos materiales que tiene la propiedad de responder de manera significativa a estímulos que son expuesto y de diferente naturaleza como son: mecánica, térmica, magnética o luz. En la Figura 4 se observa una representación del efecto piezoeléctrico directo e inverso: (a) efecto directo: cuando se aplica una fuerza mecánica sobre el material se induce una diferencia de potencial (se enciende el foco), y (b) efecto inverso: cuando se aplica una diferencia de potencial sobre el material piezoeléctrico este modifica su forma.

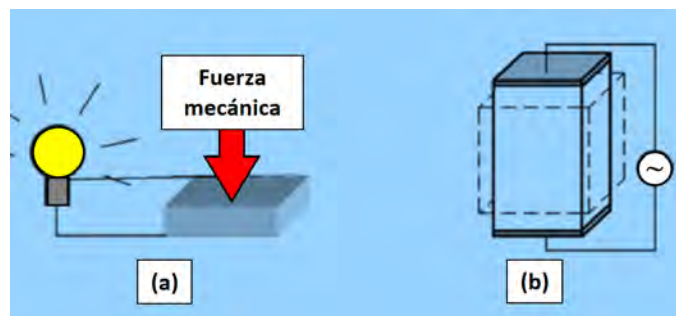


Figura 4 Efecto piezoeléctrico directo e inverso

2.3.2 Los materiales piezoeléctricos

Estos pueden dividirse en dos tipos principales: naturales y sintéticos. Los piezoeléctricos naturales presentan el efecto sin tener que adaptarlos o modificarlos para ello, mientras que los sintéticos, hay que manipularlos para que obtengan esta característica; la Tabla 3 ilustra los diferentes materiales piezoeléctricos

Tabla 3. Materiales piezoeléctricos comunes en la naturaleza [10]

Piezoeléctricos naturales	Piezoeléctricos sintéticos
Cuarzo	PZT (Titanato de plomo con zinconato)
Sal de Rochelle	PVDF (Polímero de fluoruro de polivinilideno)
Turmalina	Titanato de bario
Topacio	Óxido de Zinc
Sacarosa	

De igual manera, existen en el mercado diversos tipos de materiales *piezoeléctricos*, la eficiencia de varios materiales respecto de la producción de energía, se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Eficiencia de diversos piezoeléctricos [12]

Efficiency	Note
~50%-90%	PZT; bimorph cantilever; vibration; theoretical estimation
>80%	PZT; tube; flow-induced vibration; theoretical estimation
2.56%	PVDF film; rainbow bimorph; theoretical estimation
21.8%	PVDF nanofiber; direct deformation; experimental data
7.5%	PZT; flextensional structure; direct deformation; experimental data
>80%	PZT; fixed-fixed bimorph plate; theoretical estimation
~7%	PZT; cantilever; vibration; experimental data
0.72%	PZT; cantilever; fluid flows experimental data
5.4%/14.9%/27.5%	PZT/PMN-PT/PZN-PT; cantilever; vibration; experimental
<44%	PZT; bimorph cantilever; vibration; theoretical estimation
3.1%	PZT sandwiched between two Terfenol-D discs
1.2%	PZT; Impact-type using a rotational flywheel; experimental data
26% <2%	PZT cantilever beam; vibration; on-resonance/off-resonance; experimental data
12.47%	PVDF/AIO-rGO beam; direct deformation; experimental data
80.3%/35.1%/15.4%	Stack/Membrane/Cantilever; ball drop impact; experimental data
10%	PZT fixed-fixed beam; ball drop impact; experimental data
5%-18%	Piezoelectric nanowires; direct deformation; experimental data

Un material piezoeléctrico es más eficiente si se somete a una vibración. Cuando el material es deformado macroscópicamente, también lo hace de forma microscópica, produciendo desplazamiento de cargas internas en su estructura molecular. La deformación de la célula elemental que genera un pequeño dipolo a nivel molecular, ocurre en todo el sólido expuesto, todos los dipolos se suman generando un potencial eléctrico cuya dirección depende de la aplicación de la fuerza excitante [12].

2.3.3 Formulación matemática del efecto piezoeléctrico

Para representar matemáticamente el funcionamiento y características de un material piezoeléctrico, se desarrollarán las siguientes ecuaciones considerando lo expuesto por [10] que describen su comportamiento frente a los distintos tipos de excitación. Si la densidad de carga en la superficie de un material piezoeléctrico al aplicar una fuerza externa es proporcional a la tensión mecánica aplicada (efecto directo), esta estará descrita por la ecuación (7).

$$P = dT \quad (7)$$

Donde:

P = Vector de polarización eléctrica (dipolo), producto del efecto piezoeléctrico, magnitud igual a la densidad en la superficie considerada [Coulomb/metros²].

d = constante de deformación piezoeléctrica [metros/Voltios].

T = Tensión mecánica aplicada al material [Newton/metros²].

Modificando la ecuación anterior en función del campo eléctrico y del desplazamiento eléctrico, se obtiene la ecuación (8).

$$P = D - \varepsilon^T E \quad (8)$$

Donde:

D = desplazamiento eléctrico; ε^T = permeabilidad eléctrica; E = campo eléctrico

A partir de las ecuaciones (7) y (8) obtenemos la ecuación (9).

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (9)$$

Utilizando g como la constante de carga piezoeléctrica. Relacionada con d con la ecuación (10).

$$\varepsilon^T: g = d/\varepsilon^T \quad (10)$$

Con las ecuaciones (9) y (10) se obtiene la ecuación (11).

$$E = -gT + \frac{D}{\varepsilon^T} \quad (11)$$

La ecuación (12) representa el efecto piezoeléctrico inverso, consiste en la deformación del material a causa de un campo eléctrico (efecto inverso).

$$S = dE \quad (12)$$

Donde:

S = Deformación mecánica unitaria causada por el efecto eléctrico.

d = constante de deformación piezoeléctrica [metros/Voltios].

E = magnitud del campo eléctrico [Newton/Coulomb].

La deformación mecánica S en función de la constante de carga piezoeléctrica g y del desplazamiento eléctrico D , está dada por la ecuación (13).

$$S = gD \quad (13)$$

La deformación de un sólido elástico en presencia de una tensión depende de la ecuación (14).

$$S = sT \quad (14)$$

Donde:

s = inverso del módulo de Young;

T = Tensión mecánica

Con s^E = coeficiente de deformación elástica (campo eléctrico constante – inverso del módulo de Young), se expresa las ecuaciones (15) y (16).

$$D = \epsilon^T E + dT \quad (15)$$

$$S = dE + s^E T \quad (16)$$

Se calcula la carga que genera un material piezoeléctrico sometido a una fuerza y un campo eléctrico igual a cero, para un campo eléctrico $E=0$, la ecuación se reduce a la ecuación (17).

$$D = dT \quad (17)$$

La densidad de carga (q) está definida por la cantidad de Coulomb (C) que atraviesa un área (A). Mientras que, la tensión aplicada será igual a la fuerza (F) entre el área (A); ejemplo, Figura 5.

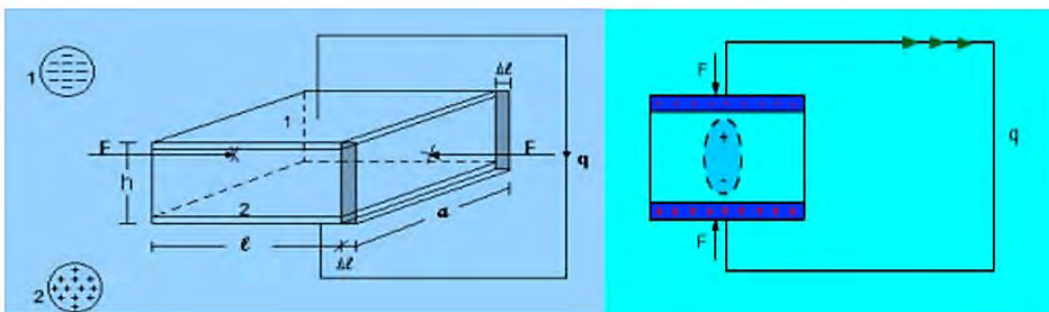


Figura 5. Efecto piezoeléctrico directo y efecto piezoeléctrico inverso

Con las ecuaciones (19) y (20) se obtiene la carga dada por la ecuación (21).

$$D = \frac{q}{A} = \frac{q}{l \cdot a} \quad (19)$$

$$T = \frac{F}{h \cdot a} \quad (20)$$

$$q = \frac{d \cdot l}{h} F \quad (21)$$

2.3.4 Transductor piezoeléctrico

En este componente del sistema, es donde se produce el efecto electromecánico, gracias al efecto piezoeléctrico la energía pasa de mecánica a eléctrica, debido a la deformación del material. Para el caso de un disco piezoeléctrico (diámetro \approx 5 veces mayor que su espesor) compuesto por PZT, el voltaje entrega la fuente, es directamente proporcional a la tensión aplicada sobre el material piezoeléctrico. Este depende del material, la geometría y la fuerza aplicada, y expresada en la ecuación (22).

$$V = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{t}{d^2} \cdot g_{33} \cdot F \quad (22)$$

Donde:

V = diferencia de potencial

t = espesor de la cerámica piezoeléctrica

d = diámetro

g_{33} = constante piezoeléctrica

F = fuerza aplicada sobre el material

2.3.5 Aplicaciones de los piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico no es un tema nuevo, y el incremento en el avance de nuevas tecnologías en el uso eficiente de la energía y su generación, crean el ambiente propicio para valorar el uso de posibles aplicaciones utilizando materiales que tengan estas características. El desarrollo de esta tecnología es principalmente aplicado en la generación eléctrica para usos domésticos, sin embargo, existen investigaciones sobre el tema que hablan sobre el desarrollo en otras áreas:

- Como alimentación de sensores remotos dentro de torres de enfriamiento de las centrales energéticas convencionales. Estas centrales energéticas producen vapor de agua que puede ser condensado y así aprovechar las gotas de agua que caen por efecto de la gravedad [13]
- En los sensores que detectan la lluvia. Al utilizar esta tecnología en el sensor, este solo enviaría señales eléctricas al tomar contacto con la lluvia [13].
- En la construcción. Podrían instalarse estos elementos piezoeléctricos en las ventanas, para que cuando entren en contacto con la lluvia, cierren las mismas [13].
- Como complemento en los paneles solares, ya que estos recolectarán electricidad, justo cuando el panel solar atraviesa por su zona de menor captación de electricidad, cuando llueve, incluso de noche [13].
- Ecopad [7] sugiere que un futuro las Tablet no requerirán cargadores eléctricos, ellos teorizan que si una persona utilizándola hace contacto (táctil) con la pantalla de este artefacto por lo menos 10 mil veces por día, esta acción generará la electricidad suficiente para mantenerla cargada.

3. MÉTODO

Existen diversas maneras de producir electricidad a partir del agua, ya sea almacenada (hidroeléctrica) aprovechando su caudal, o aprovechando la acústica generada al impactar sobre una superficie (por ejemplo, el sonido de una cascada), sea como caudal o como lluvia. Aunque este segundo punto es interesante, y valdría la pena discutirlo en una próxima investigación; el tema que se relaciona con esta investigación es la aparición de los materiales piezoeléctricos. Estos, poseen átomos cargados negativa y positivamente, que al ser dilatados por compresión o elongación [14], cambian la disposición de los átomos; entonces se genera carga positiva de un lado del material y del otro lado carga negativa; al interconectar esta diferencia de potencial por medio de un circuito de cobre [9], se genera un paso de electrones, energía eléctrica.

Construir un recipiente que almacene lluvia durante un tiempo, y luego se libere para generar un caudal que mueva un molino o turbina para generar corriente eléctrica. Un procedimiento similar al que utilizan las hidroeléctricas con el caudal de los ríos [15]. Otra opción, es la de elaborar un número de micro-turbinas, lo suficientemente sensibles a la caída de una gota de lluvia, la cual, al moverse por acción de la lluvia, generan una corriente eléctrica, de la misma manera que un dinamo genera tal corriente [16].

Es de interés la conversión de energía mecánica en energía potencial eléctrica mediante los materiales piezoeléctricos. Es común ver en la actualidad pantallas táctiles, las cuales para funcionar aprovechan la corriente eléctrica generada por el contacto humano [17]. Este contacto produce una deformación en el material produciendo una diferencia de potencial. Esta presión para efectos de la investigación, no sería ejercida por el cuerpo humano, en cambio, sería remplazada por la energía mecánica de la lluvia. Las pruebas realizadas han mostrado que los materiales piezoeléctricos de cuarzo, generan entre $1\mu w$ y $12mw$, esto depende de la intensidad de la lluvia, pues cuando llueve en forma torrencial, las gotas de lluvia son más grandes y salpican, desperdiciando parte de su energía mecánica, recolectando menor energía potencial eléctrica [13].

Como se ha indicado anterior, el Fluoruro de Polivinilideno, es un material de uso frecuente en sensores de básculas, debido a su gran sensibilidad; su eficiencia de acuerdo a las tablas presentadas anteriormente, está calculada teóricamente en un 25% [12]. El área de los piezoeléctricos a utilizar es: $3,2984 \times 10^{-4} m^2$. Para determinar la energía recibida por los materiales piezoeléctricos seleccionados, se realizaron cálculos teóricos a partir de las posibles gotas de lluvia recolectadas, en la tabla 12 se observa la potencia suministrada en el material piezoeléctrico, la cual depende principalmente de la duración de la lluvia y el área de cada piezoeléctrico.

Al consultar sobre mecanismos de producción de energía eléctrica, se encontró que los materiales piezoeléctricos se esgrimen como tecnología alternativa que puede llegar a solucionar el déficit de CEE en las regiones. Utilizando la lluvia como fuente principal generadora de energía, lo anterior debido a que estas regiones (excepto la guajira) son regiones llamadas popularmente lluviosas, se espera que estos materiales permitan convertir este fenómeno en electricidad.

Se utilizaron dos materiales piezoeléctricos de tipo cerámico: PZT comercial y el PVDF o fluoruro de polivinilideno, posteriormente se realizó un proceso de caracterización de los materiales seleccionados, para determinar su respuesta eléctrica a partir de la excitación mecánica y obtener el modelo de estudio para sistemas de recolección de energía y la relación entre cantidad de precipitación y energía eléctrica a partir del efecto piezoeléctrico, la potencia suministrada a partir de la energía mecánica presente en las gotas de lluvia. En la Tabla 5 se ilustra las especificaciones técnicas de los piezoeléctricos utilizados.

Tabla 5. Especificaciones técnicas de los piezoeléctricos seleccionados

Propiedades	PVDF	Cerámico
Características	Conexión de lengüeta de soldadura Versión sin masa	Cuerpo macizo Placa de metal, centro disco cerámico
Resistencia	-Resiste alto impacto	Excelente resistencia al impacto
Temperatura de Funcionamiento	0°C a 85°C	≤ 200° C

Se utilizaron 8 sensores piezoeléctricos PVDF sobre un acrílico, dispuestos en sentido antihorario, como se ilustra en la Figura 6.

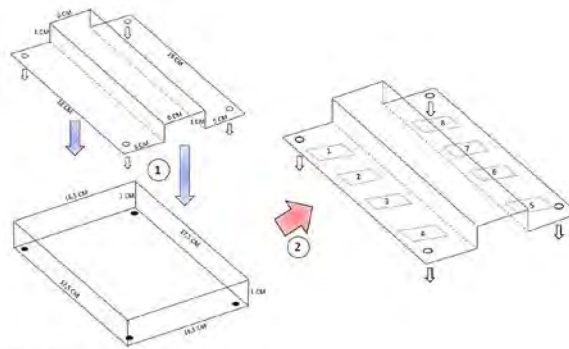


Figura 6. Montaje experimental de los piezoeléctricos PVDF en el acrílico

La ubicación de los sensores piezoeléctrico y la distancia de salida hacia la tarjeta de configuración del circuito se ilustra en la Figura 7, los sensores 1-8 A=16 cm se encuentran a la misma distancia de salida.

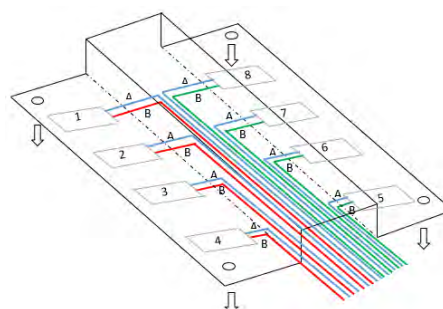


Figura 7. Montaje de configuración de salida de los piezoeléctricos a la tarjeta del circuito

3.1 Montaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos

En la Figura 8 se observa el montaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos, dispuestos sobre una estructura fabricada 100% de acrílico transparente. Las dimensiones de la base del acrílico donde están colocados los piezoeléctricos son, 31 cm de largo y 21 cm de ancho.

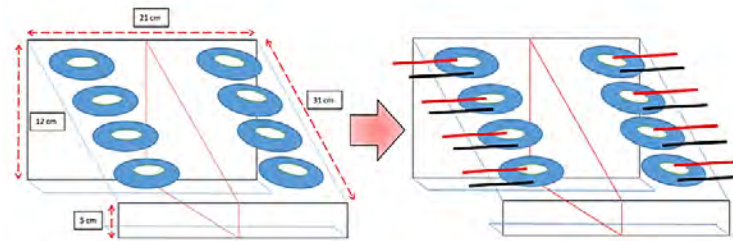


Figura 8. Montaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos en el acrílico

3.2 Circuito para la recolección de carga

En la Figura 9 se observa el esquema de configuración del circuito, la tarjeta tiene una entrada tipo HEADER (regleta hembra) de 16 entradas, las cuales se duplican para alimentar 4 interruptores tipo Deep Swith, los que permitirán controlar la configuración de las conexiones. la tarjeta de control tiene 2 salidas. La primera es el Deep Swith A, este permite el paso de corriente de cada sensor para interconectar el circuito en serie. La segunda salida Deep Swith B, permite el paso de corriente a un circuito en paralelo.

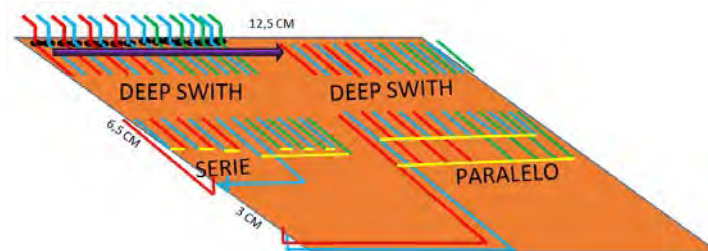


Figura 9. Esquema de configuración del circuito

3.3 Instrumentos de medición

3.3.1 Pluviómetro

Por la especial relevancia para este proceso de investigación que tiene la lluvia, es necesario utilizar un instrumento que permita medir la cantidad de precipitación; La medición de la precipitación se realiza para obtener información sobre sus características espaciales y temporales, como intensidad, frecuencia, fase, duración cantidad [18]. Por tal motivo, se utiliza el pluviómetro manual Tipo San Isidro MA15, el cual tiene un bajo costo y se encuentra calibrado a partir de un pluviómetro Hellman europeo. El error oscila entre 1 y 2 mm cada 100 mm. El pluviómetro Tipo San Isidro MA15 adquirido posee un diámetro en su entrada que corresponde a 0,1145 m, como se muestra en la Figura 10.



Figura 10 Diámetro de entrada del pluviómetro

Como la región de la entrada del pluviómetro es circular, entonces su área está dada por la ecuación (23).

$$A_p = \pi * (0,05725)^2 = 0,010296766 \text{ m}^2 \quad (23)$$

Proporcionalmente, es posible determinar entonces la cantidad de precipitación pluvial por m^2 (ecuación (24))

$$\text{Cantidad de precipitación} = \frac{\text{Recolección del pluviometro}}{0,010296766 \text{ m}^2} * m^2 = \text{Precipitaciones por metro cuadrado} \quad (24)$$

3.3.2 Osciloscopio

Para registrar las señales eléctricas arrojadas por los piezoeléctricos al estar sometido en una prueba experimental, se utilizarán dos modelos de osciloscopio, uno previamente adquirido (A) y otro que se adquirió para esta investigación (B); en cuanto a los osciloscopios y las medidas que estos registren se puede decir que hace cierta la ecuación (25).

$$A = B = \text{Osciloscopios UPB} \quad (25)$$

Es la naturaleza gráfica del osciloscopio lo que lo hace tan valorado como un instrumento de medición, el osciloscopio es un dispositivo de presentación de gráficas, es decir, traza una gráfica de una señal eléctrica [19]. La medición de la variación relativa de la fase de la frecuencia de salida de un generador de alta exactitud con respecto a una frecuencia patrón con esta técnica es muy ilustrativa y, además, constantemente podemos visualizar y controlar el desplazamiento relativo de la señal y con una resolución máxima de algunas decenas de pico segundos con un osciloscopio de 100 MHz de ancho de banda [20].

Los osciloscopios Hantek 6022BE son osciloscopios ciegos, requieren de un computador para visualizar sus lecturas, no obstante, esta característica los hace livianos y apto para trabajar en zonas de espacio reducido; su cubierta metálica de aluminio, le permite trabajar a temperaturas elevadas sin afectar su funcionamiento. Su alimentación es por puerto USB, debido a esto no requiere alimentación diferente a la proporcionada por el PC.

3.3.3 Sondas de atenuación

Las señales obtenidas durante las pruebas, son captadas por sondas de atenuación, las cuales funcionan 1:1 o 1:10. Cada sonda lleva la señal de prueba hasta el osciloscopio por un canal y como los osciloscopios A y B tiene dos canales, pueden tomarse dos señales experimentales al mismo tiempo, para su observación y análisis. Las sondas de prueba permiten integrar el osciloscopio al circuito, mediante un conector y conductor eléctrico que sirve para llevar la señal desde el circuito hasta el osciloscopio. Esta interacción debe tener un efecto mínimo sobre la manera en que el circuito opera, la señal debe ser conducida (transmitida) a través de la punta y el cable de la sonda, hasta el osciloscopio con la mayor fidelidad [19].

3.3.4 PVDF

El Fluoruro de Polivinilideno es un material de uso frecuente en sensores de básculas, debido a su gran sensibilidad; su eficiencia de acuerdo a las tablas presentadas anteriormente, está calculada teóricamente en un 25% [12]. El área de los piezoeléctricos a utilizar se determinó experimentalmente, tomando las medidas con el Nonio, $3,2984 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Teóricamente se calculó la potencia suministrada a los piezoeléctricos por efectos de la lluvia a diferentes intensidades, y duración; la precipitación por metro cuadrado, con las dimensiones de los piezoeléctricos utilizados (PVDF y cerámicos), los resultados se muestran en la Tabla 6.

Los datos teóricos obtenidos en la tabla anterior muestran potencias bajas como para suministrar energía suficiente para poner en funcionamiento alguna máquina, debido que se utilizaron áreas muy pequeñas.

En todo caso, realizando una linealidad entre el comportamiento de los piezoeléctricos, puede determinarse el área adecuada para uso de aplicaciones comerciales. Los resultados experimentales obtenidos para el material cerámico conectados en serie y en paralelo, se registran en la Tabla 7

Table 6. Energía suministrada a los piezoeléctricos (Datos teóricos)

Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm.m ²)	Duración (h)	Potencia PVDF (Joules)	Potencia Cerámico (Joules)
5	485,6	1,25	0,00017625	0,00017625
17	1651,0	0,45	0,0003525	0,00017625
12	1165,4	0,58	0,00017625	0,00017625
7	679,8	2,25	0,00017625	0,00017625
16	1553,9	0,5	0,0003525	0,00017625
10	971,2	0,83	0,00017625	0,00017625

Tabla 7. Medidas de voltajes y corrientes para el material cerámico conectados en serie y en paralelo

Evento	I (mA)	V(mV) Serie	V(mV) paralelo
1	4,98	340	
2	5	1200	
3	5,15	2950	
4	5,2	3080	
5	9,31		457
6	11,10		530
7	12,93		2410
8	13,50		3110

La Figura 11 representa las respuestas del material cerámico.

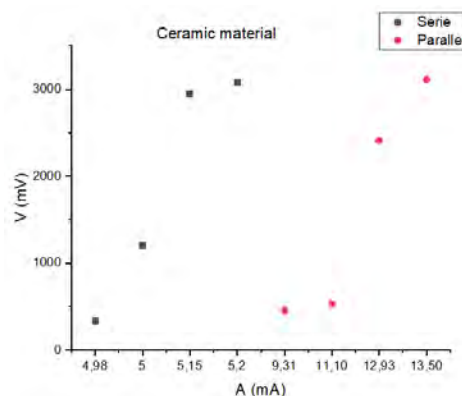


Figura 11. resultados de voltaje vs corriente para el material cerámico y conexiones en serie y en paralelo

Los resultados experimentales obtenidos para el arreglo en serie se registran en la Tabla 6, tanto para el material PVDF como para el cerámico.

Tabla 6. Medidas de voltajes y corrientes para el material PVDF conectados en serie y en paralelo

Evento	I (mA)	V(mV) Serie	V(mV) Paralelo
1	0,62	1890	
2	0,64	1910	368
3	0,65		155
4	0,66		187
5	0,67	1980	
6	0,69	2500	
7	0,73	2170	543
8	0,80		619

La Figura 12 representa las respuestas del PVDF. Las repuestas experimentales muestran que las resistencias del material cerámico presentan mayor resistencia que el material PVDF. los mejores resultados se obtienen para el material cerámico conectado en serie, las potencias que se generan son mayores que el material PVDF; las pendientes de los gráficos en los materiales cerámicos son cuatro veces mayores que

las pendientes de los gráficos en los materiales PVDF. Para el diseño del dispositivo más recomendado se debe tener en cuenta los costos de los materiales, comercialmente es mas alto el cerámico pero la el PVDF permite mejor manejabilidad.

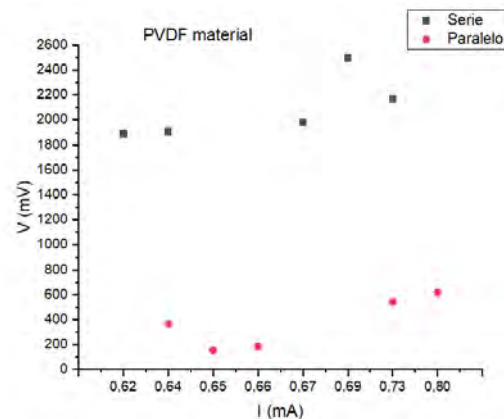


Figura 12. resultados de voltaje vs corriente para el material PVDF y conexiones en serie y en paralelo

5. CONCLUSIONES

Es factible generar energía eléctrica utilizando piezoeléctricos en presencia de lluvia. Los resultados experimentales muestran dos opciones de uso, los piezoeléctricos cerámicos y los materiales PVDF.

El uso de materiales piezoeléctricos cerámicos y PVDF, permitió estudiar su comportamiento en sistemas de almacenamiento de energía eléctrica a partir de la lluvia, además de conocer el prototipo de montaje experimental diseñado para su medición.

La energía mecánica puede transformarse en energía eléctrica, debido a la deformación del material, para el estudio realizado los datos obtenidos son teóricos, calculados a partir de las posibles gotas de lluvia recolectadas en los materiales piezoeléctricos utilizados (PVDF y cerámicos) y la energía eléctrica que reciben los piezoeléctricos en función del área.

El montaje experimental de los piezoeléctricos en paralelo y en serie, muestran que el circuito configurado en paralelo tiene una respuesta muy baja de tensión respecto a la configuración en serie.

Las repuestas experimentales muestran que las resistencias del material cerámico presentan mayor resistencia que el material PVDF.

los mejores resultados se obtienen para el material cerámico conectado en serie. Las potencias que se generan en los cerámicos son mayores que en el material PVDF. Las pendientes de los gráficos en los materiales cerámicos son cuatro veces mayores que las pendientes de los gráficos en los materiales PVDF.

Para el diseño del dispositivo más recomendado se debe tener en cuenta los costos de los materiales, comercialmente es mas alto el cerámico pero la el PVDF permite mejor manejabilidad. Para ambos casos, materiales cerámicos y PVDF, el arreglo más optimo se obtiene conectando los dispositivos piezoeléctricos en serie, ya que brindan mayor potencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Universidad Santiago de Cali.

REFERENCIAS

- [1] Enersinc. (2017). Energy Demand Situati3n in Colombia. Departamento Nacional de Planeaci3n.
- [2] Greenpeace. (2018). Impactos Ambientales del Petroleo. Recuperado: https://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2012/1/impactos_ambientales_petroleo.pdf

- [3] Aguirre R. (2018). El Colombiano. Recuperado: <http://www.elcolombiano.com/colombia/sigue-tragedia-ambiental-por-derrame-de-petroleo-en-santander-DX8451137>
- [4] Gómez, E. (2011). Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica. Pontificia Universidad Javeriana.
- [5] Fujitsu-judges-special-award. (2011). desingboom. Recuperado: <https://www.designboom.com/technology/ecopad-fujitsu-judges-special-award/>
- [6] Martínez et al. J. (2001). Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. C.& G. 15, 31-43.
- [7] Cúpich M. et al. (2000). Actuadores Piezoeléctricos. Ingenierías III(6), 1-7.
- [8] Nanodays. (2018). Efecto piezoeléctrico. Recuperado: http://www.nisenet.org/sites/default/files/catalog/uploads/spanish/12194/electricsqueeze_images_13nov13_sp.pdf
- [9] Arenas C. et al. (2010). Sensores piezoeléctricos de fluoruro de polivinilideno modificado con nanopartículas de sílice para aplicaciones en MEMS. Superficies y Vacío 23(3), 20-25.
- [10] Malmcrona A. (2018). Aplicaciones dl efecto piezoeléctrico para la generación de energía. Universidad Carlos III de Madrid.
- [11] Muñoz L. et al. (2012). Uso inteligente de la energía eléctrica, banco de recomendaciones. EPM.
- [12] Zhengbao Y. (2017). On the efficiency of piezoelectric energy harvesters. Extreme mechanics letters 15, 54-63.
- [13] Arroyo R. (2018). Temarios Formativos Profesionales. Recuperado: <https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2013/12/producir-electricidad-con-la-lluvia.pdf>
- [14] Benavente R. et al. (2014). Propiedades mecánicas y coeficiente de dilatación térmica de la B-eucríptica sinterizada por la técnica de microondas. Bletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio 53, 133-138.
- [15] Ibar J. (2005). La Tecnología Hidroeléctrica. EPEC.
- [16] Macias J. (2012). Ensayo de microturbinas hidráulicas para la generación de energía eléctrica en zonas desabastecidas (II). Universidad Carlos III de Madrid.
- [17] Wong A. (2011). Pantallas táctiles capacitivas requieren tecnología innovadora para ampliar el mercado. IDT.
- [18] IDEAM. (2020). Documentación. Recuperado: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/012406/Cap7.pdf>
- [19] Contreras R. (2017). La Sonda de Prueba del Osciloscopio. Ciencia Recreativa.
- [20] Torras G. (2005). Utilización de osciloscopios digitales para la calibración de patrones de frecuencia. Boletín Científico Técnico INIMET 1, 3-11.

Métodos de evaluación y medición de redes móviles emergentes: Aplicación NB-IoT para transportar datos de calidad del aire

Samuel Alejandro Clavijo Hernández¹

Mónica Rico-Martínez²

Yury Jiménez-Agudelo³

Luis Felipe Ariza Vesga⁴

José-Luis Cabra López⁵

^{1,2}Universidad Nacional Abierta y a Distancia

⁴ID:Tolú

⁵Fundación Universitaria Compensar

Colombia

³CUNEF

España

El advenimiento de redes móviles de quinta y sexta generación 5G y 6G, caracterizada por alta tasa de bits por segundo, mejor eficiencia espectral, baja latencia y disminución del costo de bit por segundo, entre otros beneficios, ofrece mejoras en términos de la calidad de servicio y de la experiencia mediante la optimización, el uso de inteligencia artificial, la orquestación de recursos y el incremento del portafolio de servicios de los operadores de redes de telefonía móvil inalámbrica y *broadcast*. Con las tecnologías emergentes se garantizan conexiones eficientes de banda ancha, ofreciéndole al usuario acceso ilimitado a la información, diversidad de aplicaciones en cualquier sitio y hora. Para lograr un escenario como el que se plantea es necesario diseñar, evaluar y medir las redes emergentes, por tanto, este trabajo plantea una reflexión sobre métodos que usan los investigadores como fabricantes, para analizar pruebas de concepto de redes móviles de nueva generación, exponiendo las ventajas y desventajas de algunos de ellos y aportando el análisis sobre una emulación y simulación realizada para un caso de uso de la tecnología NB-IoT y la transmisión de datos de calidad del aire.

¹ Ingeniero de Telecomunicaciones.

Contacto: muelsa16@gmail.com

² Ingeniera de Telecomunicaciones, Magíster en Ingeniería Electrónica y Doctora en Ingeniería.

Contacto: monica.rico@unad.edu.co

³ Ingeniera Electrónica y Doctora en Telemática.

Contacto: yuryandrea@gmail.com

⁴ Ingeniero Electrónico y Doctor en Ingeniería.

Contacto: lfarizav@unal.edu.co

⁵ Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería Electrónica y Estudiante de Doctorado en Ingeniería.

Contacto: jlcabra@ucompensar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El Internet de las cosas IoT se refiere al uso de dispositivos y sistemas conectados de manera inteligente para aprovechar los datos recopilados por sensores y actuadores integrados en máquinas y otros objetos. IoT comprende el uso de Internet, que es el sistema global de redes informáticas interconectadas que utilizan el conjunto de protocolos basados en el estándar TCP/IP, para servir a miles de millones de usuarios en todo el mundo. Es una red de redes que consta de millones de redes privadas, públicas, académicas, empresariales y gubernamentales, de alcance local a global, que están conectadas por una amplia gama de tecnologías de redes electrónicas, inalámbricas y ópticas [1].

Por otro lado, la palabra cosas en el contexto de IoT y como nodo de una red, se puede definir de manera global, pero con leves excepciones dependiendo la aplicación, al sistema embebido que es identificable, con capacidad de almacenar, procesar y comunicar en una red de área local la información de su entorno, adquirida por medio de sensores. Como aproximación desde la perspectiva de un usuario final, una cosa es cualquier objeto de su alcance con el que posee relación directa que mediante el acceso a una red de comunicación le provee un servicio particular.

IoT hace parte de la nueva convergencia y de las redes de nueva generación, la implementación de esta tecnología dará apertura a una nueva dimensión de servicios que mejoran la calidad de vida de los consumidores y productividad de las empresas.

NB-IoT es una tecnología emergente, que también se conoce como LTE Cat-NB1 [2], o red de área amplia de baja potencia LPWAN. Este tipo de tecnología se puede implementar dentro de una banda LTE existente, en la banda de protección de los operadores LTE o en modo independiente. Está diseñada para conectar un gran volumen de dispositivos Machine to Machine M2M dentro de IoT. Se caracteriza por proveer simplicidad a aplicaciones tolerantes a retardos y de bajo rendimiento, como medidores y sensores, y proporciona una cobertura interior muy alta. Las especificaciones básicas y de prueba para esta tecnología están definidas por 3GPP [3, 4].

También es importante mencionarla tecnología LTE-M, que también se conoce como LTE-MTC y LTE Cat M, esta es una tecnología de red de área amplia de baja potencia LPWAN que permite la reutilización de una base instalada de LTE con cobertura extendida. LTE-M, que significa LTE-Machine Type Communication MTC, también es una tecnología LPWAN desarrollada por 3GPP [3, 4] para habilitar dispositivos y servicios específicamente para aplicaciones IoT. LTE-M ofrece una velocidad de datos de 1 Mbps para 3GPP versión 13, que aumenta a 4 Mbps para versión 14, mayor movilidad y capacidad de voz a través de la red [3, 5].

En este capítulo se presentan diferentes formas de evaluar el desempeño de una red móvil, específicamente centrado en una aplicación de NB-IoT para transportar datos referentes a la calidad del aire. Como estudio de caso para evaluación de los métodos propuestos en este texto, se implementa la simulación y emulación de un sistema de transporte de datos de calidad del aire tales como PM1.0, PM2.5 y PM10, con el fin de proveer un ejemplo de medición de desempeño.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 LTE y NR (4G y 5G)

La evolución de las tecnologías móviles celulares inicia con la necesidad de conectar personas con personas y ha llegado a conectar todo con todo (cosas y personas), este ha sido un avance favorable, debido a que plantea desafíos cada vez mayores en cuanto a la latencia, la velocidad de transmisión de datos, y al número de dispositivos conectados lo que será importante para aplicaciones como la telemedicina, vehículos autónomos y aplicaciones basadas en IoT [6]. La Figura 1 identifica gráficamente la evolución de los servicios en redes móviles.

De esta forma, 4G se refiere a la cuarta generación de redes móviles que empezó en 2008 con el release 8. Los estándares para Long Term Evolution LTE están dados tanto por la Unión Internacional de

Telecomunicaciones UIT por las sugerencias IMT-Advanced [8], como la organización Third Generation Partnership Project 3GPP, que buscan consensos para definir especificaciones técnicas [9]. Dentro de los requerimientos técnicos para el despliegue de estas redes se dispuso que esta generación debería cumplir con latencias de 100 ms para aplicaciones de video, 0% pérdida de paquetes y una velocidad de transmisión de hasta 300 Mbps [10].

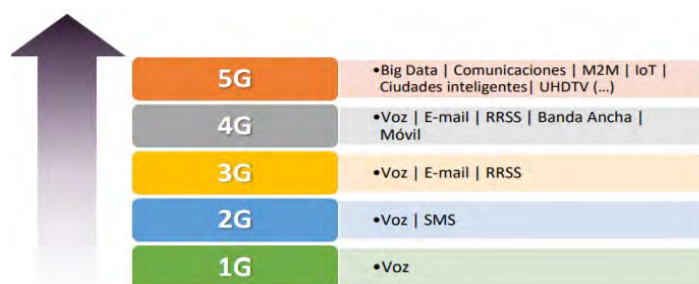


Figura 1. Evolución de los servicios en las generaciones de las redes móviles [7]

Este estándar de comunicaciones es empleado actualmente en muchos países del mundo para la subida y bajada de datos, empleando velocidades más altas que sus anteriores generaciones. Algunos autores han evaluado estas redes [11, 13], en términos de la potencia de la señal recibida RSRP, cell RRC y e_RAB, entre otros, evidenciando la evolución mediante una mejor velocidad, mejor rendimiento del sistema, mayor capacidad de descarga de datos, mejor eficiencia espectral, mejor integración con estándares de Telecomunicaciones ya existentes, reducción de los tiempos de latencia y costos de bits por segundo. Lo anterior, en gran medida debido a la multiplicidad de canales o carriles ofrecidos en la red por el uso del sistema de antenas MIMO.

Rápidamente, LTE evoluciona a LTE Advanced, alcanzando velocidades de hasta 950 Mbps, ofreciendo al usuario final mejor calidad de servicio en los servicios de video streaming, Navegación Web, juegos remotos, mundo virtual, videoconferencias, juegos en línea, etc. Esta nueva tecnología que incorpora 4G, se ha implementado en muchos países y está alcanzando madurez.

El término 5G, es utilizado para referirse a la quinta generación de telefonía móvil que inicio sus despliegues en el primer semestre de 2019, utiliza el release 15 3GPP y las recomendaciones IMT-2020. De manera general, se pueden mencionar tres características relevantes de la tecnología 5G: la ultra densificación por el uso de bandas de frecuencias mayores, el uso de mmWave que proporciona una mayor tasa de bits por segundo, y el uso masivo de múltiples entradas, múltiples salidas MIMO para ampliar la densidad espectral y permitir la técnica de beamforming [14].

5G es una tecnología con unos indicadores de desempeño que planean ser un salto revolucionario en términos de velocidad de transmisión de datos, latencia, conectividad masiva de millones de dispositivos, confiabilidad de la red, eficiencia energética, eficiencia espectral y reducción del precio del bit por segundo [15]. Estas capacidades están destinadas a realizar conectividad de alta velocidad, característica necesaria para aplicaciones como realidad virtual y aumentada, Internet táctil, entre otras aplicaciones. Se espera que los requisitos de 5G se cumplan utilizando grandes anchos de banda disponibles en bandas de ondas milimétricas, aumentando los grados de libertad espacial a través de grandes matrices de antenas y MIMO 3D, densificación de la red y nuevas formas de onda que proporcionan escalabilidad y flexibilidad para cumplir con diferentes demandas de los servicios 5G.

Asimismo, se espera que 5G sea un gran habilitador de la cuarta revolución industrial, dados los requisitos de su implementación, además, será la base para desarrollar un escenario de conexión IoT masiva (1.000.000 de dispositivos por estación base), que proporcionará aplicaciones con experiencias en tiempo real, bajo demanda, todas en línea, reconfigurables y sociales.

Es importante resaltar que la migración desde 4G LTE hacia 5G New Radio NR actualmente se realiza en dos fases, la primera es conocida como 5G NSA [16], una clase de quinta generación no autónoma, lo que se puede considerar un híbrido entre 4G LTE y 5G, porque aprovecha toda la infraestructura que pertenece a

las redes 4G heredadas, para iniciar a ofrecer a los usuarios algunas de las bondades de 5G como es el caso de la velocidad en las búsquedas en internet, pero aún no bajas latencias o la adopción de IoT de forma masiva. En otras palabras, la transmisión entre el móvil y la antena se realiza a través de protocolos 5G en la red de acceso al medio RAN, pero los datos se gestionan en tecnología LTE en la red del Core.

La segunda fase del despliegue de 5G se denomina 5G SA [17], es una quinta generación totalmente autónoma con todos los equipos y hardware definidos en el release 15 de 3GPP, esta fase es la encargada de abrir nuevas oportunidades al mercado. Nuevas aplicaciones que se consideran ciencia ficción, con velocidades de datos de hasta 10 Gbps, lo que es 10 a 100 veces más que 4G, con una latencia de 1ms, ancho de banda de hasta 1000 veces más rápida por unidad de área, reducción del 90% en el consumo de la red y hasta 10 años de duración de la batería en dispositivos IoT [18]. En la Figura 2, se presenta el esquema de la arquitectura 5G NSA en la parte izquierda y en la parte derecha la arquitectura de la red de acceso 5G SA.

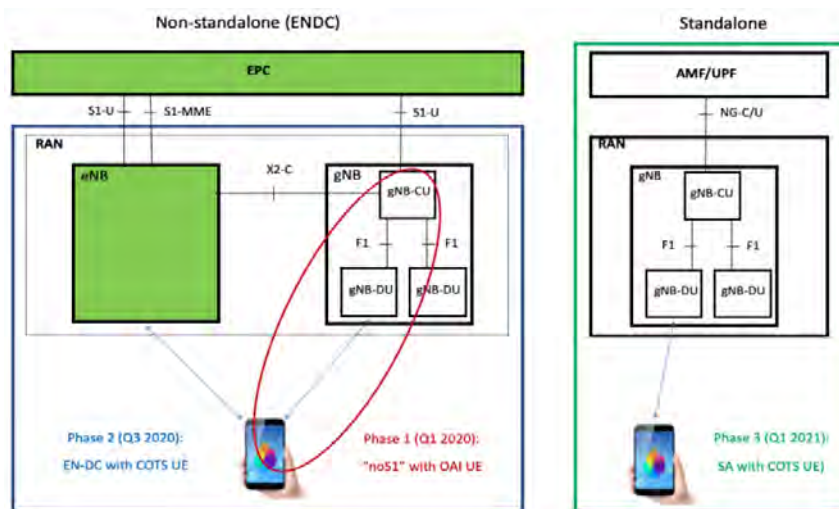


Figura 2. Esquema 5G NSA y 5G SA [19]

5G permitirá a los operadores ampliar las ofertas de servicios, imponiéndose más allá de la banda ancha móvil mejorado (eMBB) de 4ms de latencia, nuevos servicios ligados a las comunicaciones ultra fiables de baja latencia URLLC de 1ms y las comunicaciones masivas de tipo máquina mMTC, permitiendo cubrir más casos de uso e incursionar en nuevos mercados, 5G contará con una eficiencia espectral máxima de 30bps/Hz en DL y 15bps/Hz en UL [20].

Por otra parte, se han establecido diferentes bandas de frecuencia para esta nueva tecnología, frecuencias bajas aptas para cubrir áreas más grandes y llegar a ciertos espacios que no es posible con las altas frecuencias, haciendo uso de menos infraestructura porque logra sobrepasar gran parte de los obstáculos que se encuentra en su camino, pero con una tasa de transmisión de datos menor que las alcanzadas en transmisiones de datos en altas frecuencias. Por otro lado, las transmisiones en altas frecuencias, por ende, con una longitud de onda reducida, tienen una cobertura limitada, lo que hace que sea necesario una mayor densidad de estaciones base para cubrir áreas amplias en comparación con transmisiones en bajas frecuencias.

La arquitectura 5G-IoT debe poder coordinarse de extremo a extremo, mediante un funcionamiento que sea ágil, flexible, automático e inteligente. 5G deberá propiciar una arquitectura de interconexión con sistemas IoT que proporcione redes lógicamente independientes de acuerdo con los requisitos de las aplicaciones o servicios de red [21].

Finalmente, es cierto que los avances tecnológicos de las redes móviles y la llegada de cada nueva generación traen consigo enfoques hacia la prestación de más y mejores servicios, que incluye el uso más eficiente de la energía, mejor aprovechamiento del espectro (eficiencia espectral), incremento exponencial del tráfico de datos, mayor cobertura, menor costo de bit por segundo a los usuarios finales y conexión de mayor número de dispositivos, optimización y conservación de una buena calidad del servicio [21].

2.2 Técnicas para evaluar el desempeño de las redes móviles

2.2.1 Emuladores y simuladores

Un emulador es un dispositivo de hardware o un programa de software que permite que un sistema informático (también conocido como host u hospedador) imite las funciones de otro sistema informático (conocido como guest o invitado). De esta forma, el host permite que el sistema anfitrión ejecute software, herramientas, dispositivos periféricos y otros componentes que están diseñados para el sistema invitado. Los emuladores pueden ser de diferentes tipos, replicando elementos como hardware, software, sistema operativo o CPU. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la arquitectura de hardware se emula. A diferencia de un simulador, que solo realiza la abstracción del comportamiento de un dispositivo o programa, un emulador modela de forma precisa el dispositivo o programa de manera que este funcione como si se estuviera usando realmente.

Estas herramientas son de gran interés a nivel comercial (operadores y fabricantes) e investigación, para realizar pruebas de funcionamiento y rendimiento de redes de datos, teniendo acceso o no a la red física dependiendo de los casos de uso. A continuación, se mencionan brevemente diferentes emuladores y simuladores de redes de datos.

- *Emulador Keysight*: Las soluciones de Keysight abarcan y conectan todas las etapas (desarrollo, aceptación, fabricación e implementación) de 5G aprovechando el mismo hardware de la marca y utilizando herramientas de software comunes. Los emuladores permiten el trabajo en todos los dominios de prueba, incluido protocolos, la radiofrecuencia RF, la gestión de recursos de radio RRM y las pruebas funcionales y de rendimiento [22].
- *OpenAirInterface Software Alliance*: se reconoce con las siglas OSA, es una fundación francesa establecida en 2014 sin fines de lucro, financiada por patrocinadores corporativos que desarrolla ambientes para la creación de software y hardware de código abierto, todo enfocado en redes móviles, especialmente para la red central EPC y la red de acceso EUTRAN de las redes celulares 3GPP. Esta alianza se encarga del patrocinio del trabajo inicial de EURECOM para crear OpenAirInterface TM hacia el desarrollo de 5G Cellular Stack en hardware comercial listo para usar COTS. En este momento cuenta con cinco proyectos en desarrollo de software para soportar tráfico de 5G y su integración con otras tecnologías y protocolos, tales como, 5G RAN, Red Core 5G, Mosaic 5G y por último CI/CD que traduce integración continua/implementación continua. Es un software abierto que reúne a una comunidad de desarrolladores de todo el mundo, que trabajan para construir tecnologías de Red de Acceso de Radio RAN celular inalámbrico y Red Central CN (OAI21). Para implementar el uso de OSA no se requiere ningún hardware de radio ya que puede simular las interfaces necesarias para la tecnología 5G. Este software permite realizar simulación y emulación [23].
- *Polaris*: La solución NetTest 5G Network Emulator de Polaris Networks simula todos los elementos de una red 5G, dispositivos 5G UE, estaciones base 5G (gNB) y 5G Core (AMF, AUSF, NSSF, UDM, UDR, SMF, UPF, PCF y proxy de protección perimetral de seguridad (SEPP)). Las funciones de protocolo y las interfaces de los emuladores de red NetTest 5G se implementan en función de las especificaciones de la versión 16 de 3GPP que permiten a los usuarios simular varias operaciones y procedimientos de red en el laboratorio. Una implementación basada en estándares permite a los usuarios reemplazar un elemento de red emulado con un elemento de red de producción para crear topologías de red variadas, según el uso y el propósito.

Además de las operaciones y procedimientos estándar, los emuladores de red 5G brindan la capacidad de simular un comportamiento de red negativo y anormal. Los emuladores de red NetTest 5G son ideales para investigar el funcionamiento de la red al simular una red 5G de extremo a extremo. Los emuladores de red 5G de NetTest facilitan a los investigadores académicos y comerciales estudiar el comportamiento de las redes 5G en diferentes condiciones de funcionamiento, normales y anormales. Pruebas funcionales y de rendimiento de 5G gNB y 5G core, probando la compatibilidad con interfaces definidas por estándares al elegir elementos para simular desde NetTest 5G Core Network Emulators (herramienta

de prueba) y conectarlos al elemento de red 5G para probar (sistema bajo prueba). Dichas configuraciones se pueden usar para evaluar las funciones y el rendimiento del elemento de red 5G [24].

- *GNU Radio*: Se conoce como una herramienta de software de código abierto bajo la Licencia Pública General de GNU GPL versión 3 o superior. Permite procesar señales de radio mediante bloques de programación. Este potente programa tiene la capacidad de funcionar con hardware de RF para crear radios de acuerdo con el software o simplemente como simulador. GNU Radio permite escribir aplicaciones para recibir o enviar datos de flujos digitales, simular filtros, demoduladores, vocoders, decodificadores, códigos de canal, elementos de sincronización, ecualizadores, y muchos otros elementos. Todos estos componentes dentro del programa se conocen como bloques que pueden ser interconectados para transmitir datos de un punto a otro.

GNU radio solo maneja datos digitales ya que normalmente recibe muestras de señales en banda base y envía datos hacia los transmisores, sin embargo, cualquier tipo de dato (bits, bytes, vectores, ráfagas o tipos de datos más complejos) puede transmitirse de un lugar a otro. La mayoría de las aplicaciones que corren sobre GNU Radio están escritas en Python, sin embargo, el procesamiento de señales está escrito en C++. Este software cuenta con una interfaz gráfica que permite al usuario crear aplicaciones de procesamiento de señales con solo arrastrar y soltar bloques. Adicionalmente, dispone de otras funciones como la grabación de señales RF, análisis de espectro, entre otras. Se utiliza en entornos de academia, gobierno, investigación, industria y aficionados [25].

- *srsRAN*: Es un emulador que inició como simulador de redes móviles en 2014 por la empresa Software Radio Systema SRS. Inicialmente fue concebido como una biblioteca de componentes SDR gratuita y de código abierto para 4G LTE, el proyecto constaba de 11 000 líneas de código y presentaba una sencilla aplicación de búsqueda de celdas LTE, posteriormente con la inyección de recursos de la Comunidad Económica Europea, el proyecto ha desarrollado soporte para el estándar 5, agregando soporte para el UE y el gNodeB en modo NSA[26].
- *VIAVI*: Uno de los mayores desafíos que enfrentan los fabricantes y los operadores móviles a medida que lanzan 5G, es desarrollar productos que cumplan con las especificaciones 3GPP. El emulador de núcleo TeraVM de VIAVI interactúa con el móvil de prueba TM500 estándar de la industria para proporcionar una prueba completa de un gNB 5G para los modos NSA y SA. TeraVM Core Emulator permite tener independencia de RAN y Core, proporcionando un entorno de prueba controlable y repetible que ayuda a implementar estándares 3GPP rápidamente y simplifica el ciclo de vida de desarrollo de 5G gNB y la introducción de servicios 5G en el mercado [27].
- *Nokia Emulator*: El emulador de Nokia se denomina FikoRE y es un emulador de red de acceso por radio (RAN) 5G en tiempo real, diseñado para la experimentación y creación de prototipos a nivel de aplicación. Su modularidad y su sencilla implementación permiten a usuarios multidisciplinares utilizarlo rápidamente o incluso modificarlo para probar sus propias aplicaciones. El objetivo de FikoRE es principalmente estudiar cómo se comporta la red y sus diferentes configuraciones para aplicaciones y casos de uso. Está diseñado para trabajar en tiempo real, manejar el tráfico IP real eficientemente, manejar múltiples usuarios emulados con tráfico real o simulado, modelando el comportamiento de la red con suficiente precisión [28].
- *GL Emulator*: El emulador de la empresa GL se denomina: Automatización de mensajes y simulación de protocolos: MAPS™, es un simulador de la red Central CORE. El equipo de prueba MAPS™ 5G de GL admite la emulación de diferentes interfaces de red 5GC. Admite la generación de tráfico de plano de usuario de alta densidad mediante PacketLoad y RTP HD. Soporta generación y verificación de tráfico incluyendo VoNR (Voz), FTP, Web (HTTP) y Video [29].
- *Xirio*: Xirio es una herramienta software online de Aptica, que permite realizar estudios de cobertura tanto para LTE como para 5G. Ofrece una forma rápida y económica de realizar simulaciones profesionales de cobertura radioeléctrica en cualquier parte del mundo. No requiere instalación o actualizaciones y se accede desde cualquier explorador web [30].

- *Simu5G*: Es un simulador de extremo a extremo de redes 5G basado en OMNeT++. Este emulador permite escalar la red sin comprometer la precisión. Tiene la capacidad de emular en una sola máquina de escritorio cientos de usuarios simulados y decenas de celdas. Adicionalmente, permite desarrollar un modelo de aplicaciones 5G al nivel requerido de abstracción y compilar el código base real con Simu5G para realizar pruebas funcionales y evaluación del rendimiento en tiempo no real (por ejemplo, el conteo de mensajes). Finalmente, el desarrollador puede emplear Simu5G como transporte de red, haciendo que los puntos finales intercambien paquetes a través de él en tiempo real [31]
- *Colosseum*: surgió en 2020 apoyado por instituciones tan importantes como DARPA y MIT, su objetivo es proporcionar a la comunidad el emulador de radio frecuencia RF más grande del mundo diseñado para respaldar la investigación académica y el desarrollo de tecnologías de red de radio de próxima generación a gran escala en un entorno de RF repetible y altamente configurable. Para acceder a este emulador, se ingresa a una plataforma basada en la nube, la cual combina 128 nodos de radio estándar SRN con un emulador de canal digital masivo MCHM respaldado por una extensa estructura de enrutamiento FPGA. Colosseum también proporciona otros recursos para crear un escenario de radio de alta fidelidad en tiempo real, como la generación de tráfico [32].
- *Firecell*: aliado de OpenAirInterface es una plataforma centrada en redes privadas y NB-IoT en las generaciones 4G y 5G de redes celulares. Es completamente de código abierto y la novedad es que está diseñado para las futuras aplicaciones de las redes de telefonía móvil celular [33].
- *Spirent*: Es una plataforma privada que ofrece el desarrollo de servicios de telecomunicaciones, específicamente orientados a mejorar la seguridad de las diferentes redes. La plataforma ofrece diferentes casos de uso en el core 5G y pruebas de cobertura con más de 15 nodos[34].
- *Valid8*: Es una compañía que se encarga de realizar diferentes plataformas de simulación y emulación para diferentes tecnologías. En cuanto a las redes móviles, ofrecen una plataforma donde se puede: Simular escenarios de conmutación y cometer errores a propósito. Realizar análisis de seguridad y parches de prueba. Ejecutar comprobaciones de conformidad y características de la red. Emular tráfico. Gestionar el riesgo de equipos de terceros [35]

2.2.2 Test Bed

El banco de pruebas o Test Bed se emplea generalmente para investigar el comportamiento real de una red antes de ser puesta en servicio en producción. En el caso de 5G se genera un banco de pruebas para evaluar su rendimiento en casos de uso en un entorno controlado para facilitar el despliegue masivo de una red. A continuación, se presenta un conjunto de ejemplos representativos de implementaciones de Test Bed.

- *Test bed Reino Unido*: en el Reino Unido se han venido realizando diferentes bancos de prueba dentro de los cuales se destacan en este espacio siete de ellos. Por ejemplo, RAN del campus de la Universidad de Surrey, está diseñado como una red urbana ultradensa que consta de más de 45 sitios que admiten tecnologías 4G/LTE y 5G-NR en la configuración NSA. La red es compatible con funciones RAN avanzadas, como agregación de portadoras, comunicación masiva de múltiples entradas y múltiples salidas y ultra confiable de baja latencia. 5G RuralFirst es un banco de pruebas para evaluar la conectividad móvil y 5G en áreas remotas de difícil acceso. 5G Smart Tourism, habilita el uso de tecnologías de realidad virtual y realidad aumentada para mejorar las experiencias de los visitantes en museos y festivales.

Worcestershire 5G Consortium, es una plataforma para que la industria del Reino Unido desarrolle y pruebe tecnología de próxima generación que podría revolucionar la forma en que operan las empresas en el futuro, a través de una variedad de casos de uso, incluidas posibles formas de aumentar la productividad a través de la detección temprana de fallas en las máquinas mediante robótica, capacitación remota y análisis de datos. AutoAir es un banco de pruebas que permite la exploración de la tecnología 5G en vehículos autónomos, así como en el transporte aéreo y ferroviario. Banco de pruebas integrado rural 5G 5GRIT, se emplea para conectar residentes en comunidades rurales, analiza las aplicaciones rurales, como el turismo, la agricultura y cómo 5G puede ayudar a las comunidades mal

conectadas a través de franjas del norte de Inglaterra y Escocia. Por último, Liverpool 5G Testbed, implementó tecnología 5G para personas mayores que viven de forma independiente para abordar la soledad y mejorar la comunicación con los hospitales [36, 37].

- *Pilotos MinTIC:* El Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia adoptó en 2019 una política pública que contenía las acciones requeridas para la implementación de 5G en el país. Dentro de las acciones realizadas, se encuentran las modificaciones normativas para facilitar el acceso al espectro radioeléctrico para realizar pruebas técnicas, el plan de transición a nuevas tecnologías, la revisión de las condiciones regulatorias para la entrada de 5G. A la fecha se ha realizado un TestBed que ha permitido el desarrollo de 50 pilotos de 5G para seis empresas en ocho ciudades [38].
- *Keysight Test Bed:* El banco de pruebas de Keysight de 5G proporciona un análisis potente y una visión profunda del rendimiento por aire OTA de una red gNB 5G NR. Además, realiza análisis de matrices de antenas tipo MIMO y matrices de antenas mmWave para la formación del haz. Con este banco de pruebas es posible generar y analizar señales 5G New Radio, pre-5G 5GTF, formas de onda OFDMA personalizadas y configuraciones de alto rendimiento. Ofrece soluciones rentables para fabricación y pruebas de diseño de redes. Interactúa con algunos equipos de medición de la misma marca para evaluar señales en frecuencias desde los 2GHz hasta los 110 GHz [39].
- *Indigenous 5G Test Bed:* Es un banco de pruebas 5G de extremo a extremo que abarca todos los subsistemas principales de una red 5G e I+D. El proyecto es un esfuerzo de colaboración único de un equipo multiinstitucional indio que ha mejorado la capacidad nacional en tecnología de telecomunicaciones. Comprende gNB y Core Network para satisfacer las necesidades de la India de forma autóctona y segura. El sistema está disponible en las bandas sub-6 GHz (FR1) y 26 GHz de onda milimétrica FR2. El banco de pruebas 5G también compromete CPE, un chip NB-IoT ASIC de última generación, casos de uso avanzado (IoT, Smart Meter, V2X), tecnología avanzada (Lifi como mecanismo de entrega de alta velocidad de última milla, solución Multi-RAT).

El Hardware y el Software desarrollados en el proyecto están disponibles para las entidades que deseen hacer un uso comercial de las IP a través de modelos de licenciamiento flexibles según las políticas de los Institutos involucrados. Está disponible para el mundo académico, las instituciones de investigación, los organismos gubernamentales y la industria para diversas actividades de I+D, desarrollo de productos y de capacidades, con el fin de fomentar el desarrollo del ecosistema 5G en India [40].

- *Universidad de Bristol Test Bed:* Es una red multiusuario conectada a través de una fibra de 10 km con varios nodos de conmutación activos. La red central está ubicada en el laboratorio de la Red de Alto Rendimiento HPN de la Universidad de Bristol y un nodo de computación perimetral adicional disponible en otra ubicación conocida como Watershed. El banco de pruebas 5G de la Universidad de Bristol ofrece un entorno automatizado y programable que se implementa a través de la interfaz de 5GinFIRE [41].
- *Test Bed Estados Unidos:* En Estados Unidos, la Fundación Nacional de Ciencias NSF reunió un consorcio industrial de 28 empresas y asociaciones de redes para construir un conjunto de bancos de pruebas 5G en Nueva York y Salt Lake City, Utah. Esta plataforma para la investigación de 5G avanzada durante 7 años ha servido para probar aplicaciones intensivas de datos en robótica, realidad virtual y seguridad vial. Asimismo, en la Universidad de Rutgers, la Universidad de Columbia y la Universidad de Nueva York lideraron una colaboración para realizar un banco de pruebas de las nuevas tecnologías móviles, la cual se denominó COSMOS. COSMOS tiene una inversión de 22,5 millones de dólares para experimentar con transmisiones con baja latencia, ancho de banda ultra alto y computación perimetral con redes 5G. COSMOS se desarrolló en West Harlem y ha venido probando una alta gama de aplicaciones, incluidos vehículos asistidos por la nube, realidad aumentada y realidad virtual para usuarios móviles. El objetivo principal de COSMOS es crear una plataforma de aprendizaje innovadora basada en la nube para estudiantes [42].
- *Powder:* El proyecto POWDER-RENEW es una colaboración entre la Universidad de Utah, la Universidad Rice y Salt Lake City con apoyo del estado. El propósito es permitir la investigación diferentes áreas

técnicas, entre ellas se incluye 5G, arquitecturas de red de acceso de radio RAN, modelos de red, MIMO masivo, entre otros. A este banco de pruebas se puede acceder remotamente desde cualquier parte del mundo. El banco de pruebas proporciona recursos de nube, computación, almacenamiento y radio de última generación, así como la capacidad de trabajar con marcos de hardware y software existentes, o de construir nuevos desde cero [43, 44]

- *AERPAW*: Esta ligada al proyecto anterior PAWR, contó con un financiamiento de 24 millones de dólares por parte de Estados Unidos. Se constituye como una plataforma de investigación inalámbrica avanzada, dirigida por la Universidad Estatal de Carolina del Norte, en asociación con el Centro de Investigación Inalámbrica de Carolina del Norte, la Universidad Estatal de Mississippi y Renaissance Computing Institute RENCi de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill; los socios adicionales incluyen Town of Cary, City of Raleigh, North Carolina Department of Transportation, Purdue University, University of South Carolina, entre otros. La novedad de esta plataforma es que provee nodos móviles 5G que funcionan a través de Drones[45].

3. MARCO REFERENCIAL

Xiang [46] simula mediante el software OpenAirInterface OAI una red LTE utilizando máquinas virtuales para el eNB y un User Equipment (UE), para conectarse a la estación base creada. En una segunda fase de este trabajo, realiza el análisis de los resultados obtenidos mediante simulación. Para la implementación del escenario virtualizado se utilizó la tarjeta de desarrollo bladeRF, la cual funcionó como estación base de una red LTE con resultados favorables. El autor pudo conectar un UE a la red virtualizada y reproducir videos a una velocidad óptima sin problemas. La plataforma OAI es una excelente opción para trabajos de investigación de redes móviles, sin embargo, también presenta debilidades, como la compatibilidad con algunos UE, inestabilidad en algunas secciones y complejidad en los procesos de ejecución del software.

El propósito principal del proyecto OAI 5G RAN es construir todas las entidades de la red de acceso 5G tanto para gNB como para UE implementando todos los niveles de la pila de protocolos del estándar 3gpp reléase 15. Al adicionar el next generation core a la RAN anterior, es posible realizar una implementación de un extremo a otro en una red 5G. En este proyecto se desarrolla el software 5G Non-Stand Alone NSA y Standalone SA [47], permitiendo la conexión y tráfico con un User Equipment UE y el gNB se complementa con el LTE eNB que lleva el plano de control de la señalización 5G. La red central de paquetes evolucionada EPC 4G compatible con NSA está conectada a través de la interfaz S1 a eNB y la interfaz X2-C permite la conexión entre eNB y gNB para enrutar y administrar el flujo de tráfico IP. Todo este proceso cuenta con su hoja de ruta establecida que se puede encontrar en la página de referencia [19].

El proyecto RED CORE 5G OpenAirInterface se divide en tres fases. La primera es el despliegue básico de AMF, SMF y UPF en contenedores docker basados en Ubuntu bionic con pruebas básicas de tráfico y flujo de llamadas. La segunda fase es la implementación continua de funciones como actualizaciones agregadas para los componentes de red existentes: AMF, SMF y UPF, y la tercera es la implementación del núcleo 5G independiente para una arquitectura basada en microservicios. En la Figura 3 se puede apreciar una comparación entre los nodos que funcionan en 4G y que serán reemplazados por nuevos nodos virtualizados en 5G [48].

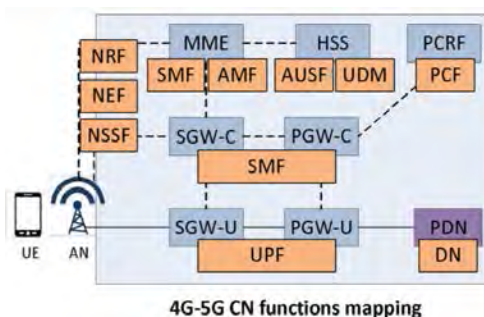


Figura 3. Comparación de arquitectura 4G y 5G [49]

El proyecto OpenAirInterface MOSAIC5G fue creado en 2021 y propone transformar el acceso a la RAN, así como a las redes centrales CN para entregar servicios más rápidos en redes abiertas, de esta manera pueden explorar diferentes casos de uso en las líneas industriales de producción. Mosaic5G es el primer entorno del mundo de plataformas de código abierto de I+D 5G, que cubre el plano de control hasta el acceso a la red móvil. El rumbo principal del M5G PG será facilitar ejecuciones de software de los siguientes protocolos: O-RAN E2 llamado E2 Agent, un controlador versátil de RAN llamado FlexRIC, un controlador Core flexible llamado FlexCN y un operador RAN y CN inteligente llamado Trirematics. Desde el 2021 hace parte de la OSA [50].

Simu5G es un emulador basado en OMnet++. En [51] describen las opciones de modelado que permiten escalar la emulación sin comprometer la precisión, demostrando que es posible emular en tiempo real una red 5G con diez celdas y mil UE, con un tráfico de aplicaciones superior a 1,6 Mbps, a través de un computador de escritorio. Adicionalmente, presentan una evaluación de las capacidades de emulación de Simu5G, demostrando que las redes con cientos de usuarios simulados y decenas de celdas se pueden emular en una sola máquina de escritorio.

En [52] se describe la red 4G/5G creada con Open Air Interface, demostrando la eficiencia de la emulación. Para este trabajo se emplea un banco de pruebas creado con módulos OAI y OAISIM (OpenAirInterface System Emulation) para emular una red LTE. El sistema demostró ser eficaz en la creación de una red 4G/5G funcional que logra resultados reales para facilitar la investigación.

4. MÉTODO

4.1 Software empleado

Para simular el procesamiento de señales de radio entre el GNB y el UE se utilizó GNU radio y OpenAirInterface como plataforma de tecnología RAN celular inalámbrico y Red Central CN.

4.2 Diseño de la red de transmisión de datos de la calidad del aire en Bogotá a través de 4G

En Bogotá, la Red de Monitoreo de Calidad del aire de Bogotá RMCAB cuenta con 20 estaciones equipadas con sensores y analizadores automáticos que reportan datos actualizados periódicamente, informando la calidad del aire en la ciudad. Cada estación se encuentra ubicada estratégicamente atendiendo a los requerimientos definidos en la normatividad vigente, lo que permite un barrido por la ciudad para informar la cantidad de material particulado PM10 y PM2.5 en el ambiente y otras variables como O3, SO2, NO2 y CO [53]. En la Figura 4, tomada de la página de la secretaría de Ambiente, se muestra la ubicación geográfica de las 20 estaciones de monitoreo.



Figura 4. Mapa de las 20 estaciones de monitoreo RMCAB [53, 54]

Cada estación de monitoreo es independiente y gracias al aplicativo de la web de la secretaria se pueden exportar reportes filtrando la estación de interés, especificando el día o la hora de la medición. Además, los reportes pueden obtenerse en diferentes formatos, tablas, gráficos o en un archivo de hoja electrónica.

Tomando como referencia la estación de Puente Aranda, un sector de alto tráfico vehicular en Bogotá. Al analizar los datos se observó que los datos de la calidad del aire son variables a través de todo el día, por ejemplo, para un día de la semana la medición de partículas PM10 tuvo un pico máximo de $32 \frac{\mu g}{m^3}$ a las 12:00 horas y un mínimo de $12.3 \frac{\mu g}{m^3}$ a las 20:00, mientras que para las partículas PM2.5 se tienen mediciones con un pico máximo de $18.6 \frac{\mu g}{m^3}$ a las 07:00, 09:00 y 14:00 horas y un mínimo de $3.3 \frac{\mu g}{m^3}$ a las 20:00. Adicionalmente, existe la posibilidad que en ciertos horarios no queden registrados los datos, lo que indica que en ese horario los instrumentos de medición no trabajaron de manera correcta o se tiene algún error de configuración interna.

Con base en el análisis cualitativo de datos recolectados por la RMCAB, los reportes generados cada hora podrían no ser representativos para informar a la ciudadanía la calidad del aire que se está respirando en la ciudad. Para argumentar esta hipótesis, se realizó una búsqueda de trabajos relacionados sobre mediciones de calidad del aire. En el proyecto de investigación presentado en [55], los autores combinan las mediciones de cuatro estaciones de monitoreo del aire en sitios fijos y móviles generando túneles de viento en laboratorio, para examinar cómo el transporte y la dispersión de los contaminantes emitidos por el tráfico varían con los cambios en la configuración de las carreteras.

Los datos se recopilaron en un tiempo promedio de 1 minuto, ubicando las estaciones estratégicamente, una estación fue ubicada a 100 metros en dirección predominante contra el viento, mientras las otras tres estaciones fueron ubicadas a 20 metros, 100 metros y 300 metros en la dirección a favor del viento. Este estudio de la variabilidad de la calidad del aire demostró que las características urbanas influyen en el transporte de material contaminante, así como la ubicación de las estaciones y la altura a la cual se ubicaron.

Para mediciones más precisas de la calidad del aire de Bogotá, es necesario tener estaciones móviles y fijas para correlacionar los datos, otras alternativas pueden ser tener puntos de medición separados por distancias más cercanas a las actuales para cubrir el área de Bogotá que es de aproximadamente $307 Km^2$. Como estudio de caso, una primera aproximación para evaluar el funcionamiento de una red móvil emergente, se implementa la simulación y emulación de una red de transporte de datos de calidad del aire, que incluye datos de partículas PM1.0, PM2.5 y PM10, con el fin de proveer un ejemplo de medición de desempeño.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Red emulada de Transmisión NB-IoT orientado a redes emergentes empleando Open Air Interface

Para emular una red de transmisión NB-IoT, es necesario determinar las ubicaciones de los elementos del CORE y la RAN (Radio Access Network) en una red móvil emergente. En la Figura 5 se observa la conexión de los elementos físicos de la red móvil; El portátil, carga el programa de Quectel con los comandos AT para controlar el módulo NB-IoT BC95 por cable serial. Por último, la USRP controlada desde cable USB 3.0 permite la transmisión de las señales al aire de estación base (eNodeB).

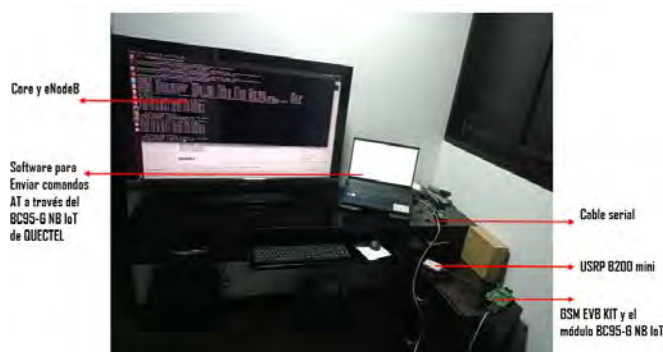


Figura 5. Conexión física de los equipos

Como resultados de esta emulación, a través de OpenAir Interface se pudo observar que para emular una red, se requiere un ordenador con sistema operativo Linux. Para el correcto funcionamiento de la red, en

proyecto se empleó Ubuntu 16.04 LTS, así mismo, un procesador Core i5 o superior y memoria RAM de 8 GB o superior y sistema operativo de 64 bits, con el fin de garantizar el rendimiento del software que se va a ejecutar simultáneamente.

Para emular la red, se debe clonar todos los componentes de la red mediante consola y hacer ping a la entidad para comprobar que la entidad se encuentra funcionando. Para emplear Open Air Interface se requiere que el desarrollador conozca de Linux y las diferentes líneas de código necesarias para la emulación.

En este capítulo no se detallarán los resultados obtenidos de emulación porque la intención es ofrecer una reflexión sobre los métodos empleados para probar una aplicación en una red móvil emergente. Teniendo en cuenta lo anterior, la emulación permite el conocimiento detallado del funcionamiento lógico de los componentes de una red móvil. El balance de la implementación es útil cuando no se tiene los recursos económicos para emplear un banco de pruebas o los equipos de hardware necesarios.

Con este tipo de emuladores es posible analizar el desempeño de una aplicación como lo es la transmisión de la calidad del aire a través de equipos en una plataforma *cloud*. Dichas aplicaciones se podrán desplegar con facilidad cuando se implementen las redes móviles emergentes en los territorios.

5.2 Red simulada a través de GNU Radio

Para probar una red simulada con GNU Radio, se tuvo en cuenta que en una red móvil 4G o 5G emplea multiplexación por división de tiempo ortogonal OFDM. En ese sentido se simuló la transmisión de datos entre la estación base y el UE usando esta configuración. Adicionalmente, se utilizaron otros bloques para medir algunos indicadores de calidad KPI, como, por ejemplo, el bloque probe rate para medir el throughput y el bloque BER para medir la tasa de error de bit. Para efectuar las simulaciones, fue necesario precisar la frecuencia de las mediciones, el tamaño y procedencia del paquete de datos, así mismo, plantear el escenario de simulación para cumplir el objetivo de obtener datos de alta confiabilidad, que no se explican en el presente capítulo debido a que hacen parte de los resultados específicos del proyecto.

El dataset usado para las transmisiones fue construido de tal forma que tuviera la misma cantidad de datos igual al que arroja el sensor PMS5003 tomado como referencia para las simulaciones de transmisión de datos de calidad del aire de Bogotá. De esta forma los datos enviados contenían 9216 bytes de información, en formato ASCII. En la Figura 8 se observa la simulación realizada.

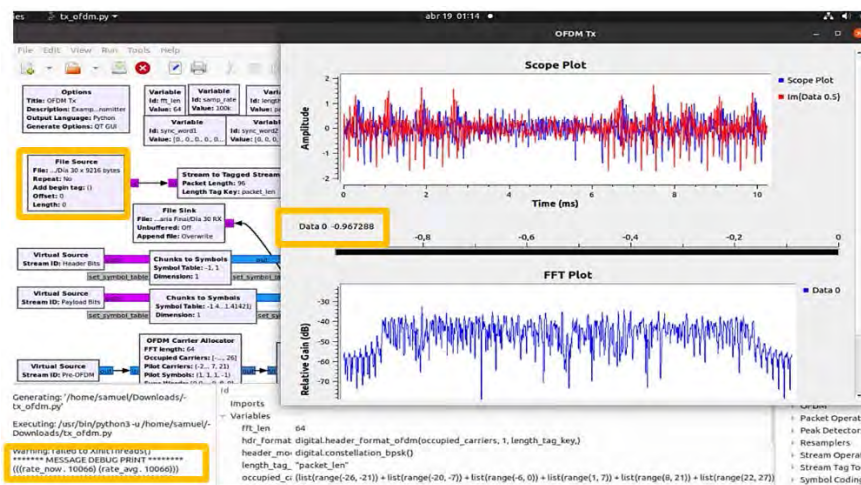


Figura 8. Simulación del paquete enviado con GNU radio

Con respecto a la simulación, se pudo evidenciar que solo se puede analizar el plano de usuario en una red de acceso móvil, en este sentido existen estudios donde se emplea la radio definida por software y las tarjetas USRP, pero la combinación los convierte en un emulador, que a la fecha no se ha establecido para múltiples Unidades remotas de radio RRU.

6. CONCLUSIONES

El futuro de las redes de telecomunicaciones será la comoditización del hardware y el uso del software para emular todas las entidades de la arquitectura de redes celulares. Con lo anterior solo es necesario utilizar procesadores de propósito general y unidades de radio para poder generar innovación desde el software.

5G es una tecnología reciente que presenta desafíos, uno de los mayores desafíos que enfrentan los fabricantes y los operadores móviles a medida que lanzan 5G es desarrollar productos que cumplan con las especificaciones 3GPP, lo que justifica el uso de las herramientas presentadas en este estudio.

En este estudio no se detalla la red usada para el caso de uso, ya que el objetivo principal es aportar una reflexión sobre las diferentes técnicas que hay actualmente para probar una aplicación sobre redes móviles emergentes.

En este capítulo de libro, se presentan diferentes formas de evaluar el desempeño de una red móvil, específicamente centrado en una aplicación de NB-IoT para transportar datos referentes a la calidad del aire. Existen diferentes herramientas para evaluar el funcionamiento o características técnicas específicas de una red 5G, simuladores, emuladores y prototipos. En muchas situaciones, los emuladores representan una buena compensación en términos de flexibilidad y realismo.

REFERENCIAS

- [1] Stoica M. et al. (2021). IoT and Smart Cities – the Fundamental for an Intelligent Life Style. *Informática Económica* 25(4), 17-24.
- [2] LTE Cat NB-IoT | LTE Cat-NB1 | LTE Cat-M2 | LTE Cat NB-IoT Module | LTE NB-IoT. (2018). Module for sale. Recuperado: <https://www.4gltmall.com/ue-category/lte-cat-nb1.html/>
- [3] ITU. (2018). IoT Standards Recuperado: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/Documents/Events/2018/IoT-BDG/7.%20IoT%20Standards%20Part%20II%20-%20Sami%20Tabbane.pdf>
- [4] ITU. (2019). RAN approved REL-13 NB_IOT CRs (RAN#72). Recuperado: https://www.3gpp.org/news-events/1785-nb_iot_complete
- [5] IOT. (2018). LTE-M vs NB-IoT: Una guía y una comparación detallada. Recuperado: <https://iot.telenor.com/iot-insights/lte-m-vs-nb-iot-guide-differences/>
- [6] Kramp T. et al. (2013). Introduction to the internet of things. *Enabling Things to Talk: Designing IoT Solutions with the IoT Architectural Reference Model*.
- [7] Constaín S. et al. (2021). Plan 5G Colombia el futuro digital es de todos. Recuperado: https://micrositios.mintic.gov.co/plan_tic_2018_2022/pdf/plan_tic_2018_2022_20191121.pdf
- [8] ITU. (2017). Global standard for international mobile telecommunications IMT-Advance. Recuperado: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-adv/Pages/default.aspx>
- [9] LTE. (2017). 3GPP Specification Set. Recuperado: <https://www.3gpp.org/dynareport/SpecList.htm?release=Rel-16&tech=3>
- [10] Chang M. y Abichar Z. (2010). WiMAX or LTE: Who will Lead the Broadband Mobile Internet? *IT Professional* 12(3), 26–32.
- [11] Schwarz S. et al. (2013). Pushing the Limits of LTE: A Survey on Research Enhancing the Standard. *IEEE Access* 1, 51–62.
- [12] Toledo A. y Alarcón V. (2014). Estado actual de las redes LTE en Latinoamérica. Universidad de Cuenca.
- [13] Telecom. (2017). Telecom knowledge and experience sharing: LTE Drive test parameters. Recuperado: <https://telecom-knowledge.blogspot.com/2017/07/lte-drive-test-parameters.html>
- [14] Leider G. et al. (2015). Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: Clave para la 5G inalámbrica. *Press*.
- [15] Shafi M. et al. (2017). 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35(6), 1201–1221.
- [16] Zhao X. et al. (2020). 5G NSA Radio Access Network Sharing for Mobile Operators: Design, realization and field trial. *En International Conference on Communication Technology*.
- [17] Zhang Z. et al. (2021). Analysis of the Evolution Scheme of NSARAN Sharing to SA RAN Sharing. *International Wireless Communications and Mobile Computing* 204–211.
- [18] Mohamed R. et al. (2021). Performance Evaluation and Comparison between SA and NSA 5G Networks in Indoor Environment. *En IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking*.
- [19] OpenAirInterface. (2019). 5G RAN. Recuperado: <https://openairinterface.org/oai-5g-ran-project/>
- [20] Mitra R. y Agrawal D. (2015). 5G mobile technology: A survey. *ICT Express* 1(3), 132–137.

- [21] Peterson L. y Sunay O. (2020). 5G Mobile Networks: A Systems Approach. Agile.
- [22] Keysight. (2020). 5G Network Emulation Software. Recuperado: <https://www.keysight.com/us/en/cmp/2020/5g-network-emulation-software.html>
- [23] OpenAirInterface. (2019). Projects. Recuperado: <https://openairinterface.org/projects/>
- [24] Polaris Networks. (2018). End-to-end 5G Network Simulator. Recuperado: <https://www.polarisnetworks.net/5g-network-emulators.html>
- [25] GNU Radio. (2011). Software GNURadio. Recuperado: <https://www.gnuradio.org/>
- [26] srsLTE. (2020). The srsLTE project is evolving. Recuperado: <https://www.srslte.com/srslte-srsran>
- [27] Viavisolutions. (2016). 5G vRAN Emulator. Recuperado: <https://www.viavisolutions.com/en-uk/products/teravm-core-test>
- [28] GitHub. (2020). Nokia/5g-network-emulator. Recuperado: <https://github.com/nokia/5g-network-emulator>
- [29] GL.com. (2021). 5G Core Network Emulation. Recuperado: <https://www.gl.com/5G-core-network-emulation.html>
- [30] XIRIO. (2018). Manual XIRIO. Recuperado: <https://www.xirio-online.com/web/help/es/index.htm>
- [31] Simu5G. (2020). 5G New Radio User Plane Simulator for OMNeT++ and INET. Recuperado: <http://simu5g.org/>
- [32] Colosseum. (2020). About Colosseum. Recuperado: <https://colosseumneu.freshdesk.com/support/solutions/articles/61000269573-about-colosseum>
- [33] firecell.io. (2020). Open Source 5G. Recuperado: <https://firecell.io/open-source-5g/>
- [34] Spirent. (2022). Resumen de la solución de la plataforma de automatización central Spirent 5G. Recuperado: <https://www.spirent.com/assets/u/solution-brief-5g-core-testing-automation-platform>
- [35] Valid8.com. (2021). Simulators, Emulators, Network Conformance Testing Tools. Recuperado: <https://www.valid8.com/>
- [36] University of Surrey. (2022). 5G/6G campus testbed. Recuperado: <https://www.surrey.ac.uk/institute-communication-systems/facilities/campus-testbed>
- [37] 5G Testbeds. (2018). What are 5G Testbeds? Recuperado: <https://5g.co.uk/guides/what-are-5g-testbeds/>
- [38] Ligia et al. C. (2020). Pilotos 5G. Recuperado: https://mintic.gov.co/micrositios/plan_5g/764/w3-channel.html
- [39] Keysight. (2022). 5G R&D Test Bed. Recuperado: <https://www.keysight.com/us/en/products/modular/reference-solutions/5g-waveform-generation-analysis-testbed-reference-solution.html>
- [40] 5G Testbed. (2022). Indigenous 5G Testbed. Recuperado: <https://5gtestbed.in/>
- [41] 5GinFIRE. (2022). University of Bristol 5G Testbed. Recuperado: <https://5ginfire.eu/university-of-bristol-5g-testbed/>
- [42] IEEE Future Networks. (2017). 5G Testbed. Recuperado: <https://futurenetworks.ieee.org/topics/5g-testbed>
- [43] Reus G. et al. (2020). Trust in 5G Open RANs through Machine Learning: RF Fingerprinting on the POWDER PAWR Platform. En IEEE Global Communications Conference.
- [44] PAWR. (2022). Salt Lake City POWDER-RENEW. Recuperado: <https://advancedwireless.org/salt-lake-city/>
- [45] AERPAAW. (2019). Recuperado: <https://aerpaw.org/>
- [46] Xiang D. et al. (2018). Estudio de plataformas SDR para LTE-5G. Recuperado: <https://core.ac.uk/display/161377727>
- [47] Scalable simulators en OAI weekly meetings | Trello. (2019) Recuperado de <https://trello.com/c/DrEoa6XP/71-scalable-simulators>
- [48] Trello.com. (2018). 5G CORE NETWORK – OpenAirInterface. Recuperado: <https://openairinterface.org/oai-5g-core-network-project/>
- [49] Openairinterface. (2018). OAI 5G CORE NETWORK (CN) PROJECT GROUP-CHARTER. Recuperado: <https://openairinterface.org>
- [50] Openairinterface. (2019). OAI MOSAIC5G (M5G) PROJECT GROUP-CHARTER. Recuperado: <https://openairinterface.org>
- [51] Nardini G. et al. (2021). Scalable real-time emulation of 5G networks with Simu5G. IEEE Access 9, 148504–148520.
- [52] Nahum C. et al. (2017). Emulation of 4G/5G Network Using OpenAirInterface. Press.
- [53] Alcaldía de Bogotá. (2015). Mapa Interactivo RMCAB. Recuperado: <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/home/map>
- [54] Alcaldía de Bogotá. (2020). Red de Monitoreo de calidad del aire de Bogotá RMCAB. Recuperado: <http://201.245.192.252:81/home/text/72146>
- [55] Baldauf R. et al. (2013). Air quality variability near a highway in a complex urban environment. Atmospheric Environment 64, 169–178.

Diseño de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diésel-baterías para zonas no interconectadas: Un estudio de caso

Ana Lisbeth Galindo Noguera¹
Mayra Alejandra Barrera Fajardo²
Rodolfo Solano Silva³
Luis Sebastián Mendoza Castellanos⁴
¹ *Unidades Tecnológicas de Santander*
²⁻⁴ *Universidad Autónoma de Bucaramanga*
Colombia

En este capítulo se propone el diseño y dimensionamiento de un sistema híbrido fotovoltaico PV Eólico-Diésel implementando baterías, capaz de suplir de forma continua la demanda de energía eléctrica en localidades aisladas. El sistema fotovoltaico y el aerogenerador se moldearon a partir de bases de datos del atlas del Ideam, teniendo en cuenta irradiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente para el municipio de Uribia, Colombia. El dimensionamiento del sistema híbrido se determinó a partir de la demanda energética, implementando el método Bottom-Up, a fin de obtener un diagrama de carga diario. El escenario planteado se simuló para determinar el compartimiento de cada componente, de tal manera que permita realizar un análisis energético y económico. Se concluye que el costo nivelado de energía puede alcanzar valores de hasta 1,78 USD/kWh para el sistema híbrido propuesto.

¹ Doctora en Ingeniería Mecánica.
Contacto: agalindo@correo.uts.edu.co

² Ingeniera en Energía.
Contacto: mbarrera802@unab.edu.co

³ Ingeniero en Energía.
Contacto: rsolano411@unab.edu.co

⁴ Doctor en Ingeniería Mecánica.
Contacto: lmendoza630@unab.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es una región que cuenta con una diversidad de recursos renovables como el sol, el viento, la biomasa y las fuentes hídricas, que pueden ser transformadas a pequeña y mediana escala en energía eléctrica. No obstante, aún existen brechas con relación a la disponibilidad del recurso, la confiabilidad y la calidad de la energía, implementado solo tecnologías alternativas. La generación distribuida enfrenta varios desafíos, tales como acceso de energía a nuevas poblaciones en áreas aisladas, disminuir el consumo de combustibles derivados del petróleo, carbón y gas.

Encontrar alternativas que permitan minimizar los costos de generación eléctrica LCOE, ya que la integración de diferentes fuentes renovables a pequeña escala menor 1MWe, permite reducir costos de operación y mantenimiento. Dentro de la literatura especializada, se han encontrado diferentes autores que a través de diferentes herramientas computacionales o técnicas de optimización buscan nuevas estrategias que permitan garantizar la sostenibilidad del sistema. De acuerdo con [1] realizaron una revisión de los métodos y técnicas aplicadas en el dimensionamiento y optimización de sistemas híbridos solar y eólico para zonas aisladas.

El modelo matemático de un diodo para los paneles solares, el modelo matemático para una turbina eólica en función de la densidad del aire, área barrida por el rotor eólico y la velocidad del viento. Para el modelo de las baterías determina el estado de carga en un tiempo, el cual está dado en función de la energía demandada por la carga y la energía generada por las fuentes renovables. Además, realiza una revisión de los algoritmos de optimización en sistemas híbridos, tales como: algoritmos genéticos, enjambre de partículas, de colonias de hormiga, entre otros.

[2] centran las investigaciones en simulaciones dinámicas para sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diésel combinado con batería, que abastece una demanda eléctrica pico de 5 kW. Los resultados arrojados permitieron estimar el consumo de combustible diésel, el costo de la energía y las emisiones de CO₂, comparado con la utilización exclusiva del generador diésel. Se optimizó el sistema en cada ubicación en base al mínimo costo de energía y emisiones de CO₂.

[3] presenta el estudio de un sistema de almacenamiento híbrido super capacitor-batería, efectivo para la gestión activa de energía en un sistema eólico-diésel. Para esto, implementa un sistema de control inteligente mediante las técnicas de lógica difusa y enjambre de partículas que regula de manera óptima los transitorios que perturban el sistema. El modelo de gestión híbrido permite repeler el impacto máximo del sistema de almacenamiento de batería durante los cambios de carga y velocidad del viento.

[4] busca diseñar de manera óptima un sistema fotovoltaico fotovoltaico/eólico/diésel para un pequeño número de casas considerando la incertidumbre de la carga para la ciudad de Yanbu, Arabia Saudita. La metodología considera en su función objetivo la pérdida de suministro eléctrico y el costo de la electricidad, además, analiza dos escenarios para 5 y 10 casas determinando la configuración adecuada para cada caso.

[5] realizaron la viabilidad y el análisis tecno económico del sistema de energía híbrido fotovoltaico, eólico, diésel, batería independiente y conectado a la red. El análisis evidencia indica que los sistemas híbridos, conectados a la red proporciona importantes beneficios de costos en comparación con los sistemas independientes. Los resultados también muestran que un aumento del 70% en el precio de reventa a la red da como resultado una caída del 46% en el COE.

En [6] el estudio está basado en implementar un sistema de optimización que permita identificar la configuración óptima para un sitio dado y el tamaño óptimo de cada componente de los sistemas híbridos de Energía Renovables. Las tecnologías implementadas son turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, bancos de baterías, celdas de combustible, electrolizadores y generador diésel. Los resultados presentan versatilidad en la definición de diferentes problemas de diseño, tanto en configuración como tamaño.

[7] realizaron la optimización y el análisis tecno económico de un sistema híbrido de generación de energía Fotovoltaica, biomasa, diésel, batería fuera de la red para la electrificación rural aisladas. El estudio

evidencio el costo de la electricidad y el costo actual neto de la configuración híbrida optimizada de bajo costo más adecuada. El modelado óptimo del sistema proporciona un retorno de la inversión del 45,5%, una tasa interna de retorno del 49,4% y un período de recuperación de 2,04 años, y un playback descontado de 2,25 años del sistema sin componente solar fotovoltaico.

La propuesta de este artículo es generar un escenario de operación del sistema híbrido, que priorice siempre el despacho con energía renovable y que permita minimizar el consumo de combustible fósil y aumentar la autonomía de las baterías eléctricas. Además, para cuidar la vida útil, dentro de las estrategias planteadas se limita el uso del generador diésel para cargas inferiores a 30% de la potencia nominal.

2. MÉTODO

2.1 Descripción del sistema

El sistema híbrido consta de un sistema fotovoltaico, un generador eólico, un grupo electrógeno que utiliza diésel como combustible, un sistema de almacenamiento (banco de baterías), un inversor bidireccional, permitiendo tanto la conversión CC - CA, para atender la carga, El diagrama esquemático del sistema se muestra en la Figura 1, donde la fuente fotovoltaica y el generador eólico están conectados al bus de CC utilizando unidades de acondicionamiento de potencia, y el grupo electrógeno conectado al bus de CA.

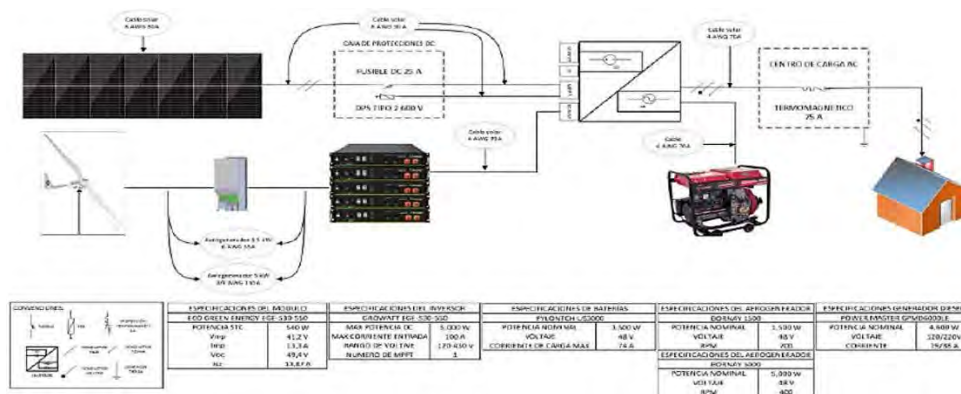


Figura 1. Sistema híbrido

2.2 Sistema fotovoltaico

El modelo del sistema es basado en la eficiencia del panel, que tiene como parámetros de entrada la irradiancia solar en el plano inclinado, la temperatura ambiente y datos de fabricante. La potencia instantánea generada por un sistema fotovoltaico es dada por la ecuación (1) [4, 5, 8].

$$P_{pv} = \eta_g * N_m * A_m * G_{inc} \quad (1)$$

Donde P_{pv} es la potencia de salida generada por el panel fotovoltaico en W, G_{inc} es la radiación solar en el plano inclinado en W/m^2 , A_m el área del módulo en m^2 , N_m el número de módulos que componen el sistema fotovoltaico y η_g es la eficiencia instantánea, que es dada por la ecuación (2).

$$\eta_g = \eta_{ref} \eta_{iv} [1 - \beta_t * (T_c - T_{cref})] \quad (2)$$

Donde η_{ref} es la eficiencia nominal del panel en condiciones estándar, η_{iv} es la eficiencia del inversor, β_t el coeficiente de variación de temperatura por potencia, T_c la temperatura de celda ($^{\circ}C$) y T_{cref} la temperatura de referencia en condiciones estándar ($^{\circ}C$), que es dad por la ecuación (3).

$$T_c = T_{amb} + \frac{T_{NOC} - 20}{800} G_{inc} \quad (3)$$

Donde T_{NOC} es la temperatura nominal de operación de la celda solar y T_{amb} es la temperatura ambiente. Normalmente, los datos de irradiancia solar son tomados sobre superficies horizontales, dado que los

paneles están colocados en un ángulo con respecto al plano horizontal se debe calcular la irradiancia en plano inclinado G_{inc} que incide sobre estos. Para obtener los valores de irradiación sobre una superficie inclinada, se debe determinar las componentes de irradiancia directa y difusa en un plano horizontal.

La radiación solar horaria extraterrestre incidente en una superficie horizontal I_o en kWh/m² desde la hora inicial ω_1 hasta la hora final ω_2 en el intervalo de una hora, está dada por la ecuación (4) [9].

$$I_o = \frac{12 \cdot G_{CS}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot d_n}{365}\right) \right] \left[\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_2 - \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) \right] \quad (4)$$

Donde ω es el ángulo horario, φ es la latitud del lugar en grados, d_n es el día juliano (1-365), G_{CS} es la constante solar (1367 W/m²) y δ es la declinación solar en grados. El ángulo horario y la declinación solar están dados por las ecuaciones (5) y (6).

$$\omega = (\text{horas} - 12\text{horas}) \cdot (15^\circ/\text{horas}) \quad (5)$$

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 \frac{284+d_n}{365}\right) \quad (6)$$

El índice de claridad horario K_T relaciona la irradiancia global horaria incidente en la superficie horizontal G_H con la irradiancia horaria extraterrestre I_o , está dado por la ecuación (7).

$$K_T = \frac{G_H}{I_o} \quad (7)$$

La relación entre la fracción difusa de la irradiancia horizontal k_D y el índice de claridad general k_T , permite obtener el valor de la irradiancia difusa a partir del valor de irradiancia global. Para el cálculo de la fracción difusa del valor de irradiancia por hora se usan las expresiones de la ecuación (8) [9].

Se $k_T < 0,22$

$$k_D = \frac{D_H}{G_H} = 1 - 0,09 * k_T$$

Se $0,22 < k_T < 0,80$

$$k_D = \frac{D_H}{G_H} = 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 \quad (8)$$

Se $0,8 < k_T$

$$k_D = \frac{D_H}{G_H} = 0,165$$

La suma de la irradiancia solar en plano horizontal G_H es igual a suma de los componentes directos B_H y difusos D_H , por lo cual el componente de irradiancia directa se puede calcular con la ecuación (9).

$$B_H = G_H - D_H \quad (9)$$

El cálculo de la irradiancia global en una superficie inclinada, se consideran los componentes de la irradiancia directa (B_{inc}) y difusa (D_{inc}) en superficies inclinadas, y el componente reflejado del suelo (ρ), como se muestra en la ecuación (10) [9].

$$G_{inc} = B_{inc} + D_{inc} + \rho * G_H * \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \quad (10)$$

β es el ángulo de orientación del sistema fotovoltaico, la componente de irradiancia directa se calcula con la ecuación (11).

$$B_{inc} = B_H \frac{\max(0, \cos(\theta_s))}{\cos(\theta_{zs})} \quad (11)$$

Donde θ_s es el ángulo de incidencia y θ_{zs} es el ángulo cenital. La componente difusa se calcula con la ecuación (12).

$$D_{inc} = D_H \left[(1 - k_1) \left(\frac{(1 + \cos(\beta))}{2} \right) + k_1 \frac{\max(0, \cos(\theta_s))}{\cos(\theta_{zs})} \right] \quad (12)$$

Donde k_1 factor de modulación denominado índice de anisotropía, determinado con la ecuación (13).

$$k_1 = \frac{G_H - D_H}{I_0} \quad (13)$$

2.3 Sistema Eólico

El modelo matemático del aerogenerador, tiene en consideración la potencia nominal P_r en kW, la velocidad de arranque V_{cut-in} , velocidad de frenado $V_{cut-out}$, V velocidad del viento y velocidad de referencia del aerogenerador V_{rated} , para el cálculo de la potencia generada en un intervalo dado [10] (ecuación (14)).

$$P_{out} = \begin{cases} 0, & V < V_{cut-in}, V > V_{cut-out} \\ V^3 \left(\frac{P_r}{V_{rated}^3 - V_{cut-in}^3} \right) - P_r \left(\frac{V^3 - V_{cut-in}^3}{V_{rated}^3 - V_{cut-in}^3} \right), & V_{cut-in} \leq V < V_{rated} \\ P_r, & V_{rated} \leq V < V_{cut-out} \end{cases} \quad (14)$$

La potencia real genera se obtiene con la ecuación (15).

$$P_W = P_{out} * C_p \quad (15)$$

Donde C_p es el coeficiente de potencia que representa la eficiencia de un rotor eólico, el cual se calcula mediante la Figura 2.

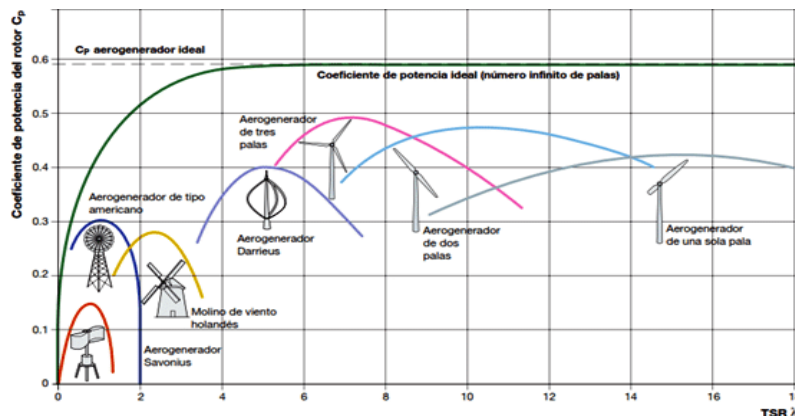


Figura 2. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica [11]

La Figura 2 relaciona el coeficiente de potencia del rotor con la velocidad de referencia del rotor para diferentes aerogeneradores, esta velocidad se calcula con la ecuación (16).

$$TSR = \frac{\pi * R * n}{30 * v} \quad (16)$$

Donde R es el radio del aerogenerador, n son las rpm y v es la velocidad media del viento. Para determinar la frecuencia de velocidades en un determinado lugar, se utiliza la distribución de Weibull (ecuación (17)). Donde A es el factor de escala, con dimensiones de velocidad y k es el factor de forma, adimensional.

$$f(v) = \frac{k}{A} * \left(\frac{v}{A} \right)^{k-1} * \exp \left[- \left(\frac{v}{A} \right)^k \right] \quad (17)$$

2.4 Modelo matemático del Banco de baterías

El modelo de estado de carga y descarga de la batería es utilizado para determinar su comportamiento en el sistema [12] (ecuaciones (18) y (19)).

$$SOC_{carga} = SOC(t-1) * (1 - \sigma) + \left((P_{FV}(t) + P_{WT}(t)) - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right) * \eta_{bat} \quad (18)$$

$$SOC_{descarga} = SOC(t-1) * (1 - \sigma) + \left(\frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} - (P_{FV}(t) + P_{WT}(t)) \right) * \eta_{bat} \quad (19)$$

El primer término representa en el estado de carga en el tiempo anterior; σ es la tasa de autodescarga dada por el fabricante; P_{load} es la energía requerida por la carga en un tiempo t ; P_{FV} es la potencia entregada por sistema fotovoltaico; P_{WT} es la potencia entregada por aerogenerador; η_{bat} eficiencia de la batería.

Durante la carga o descarga de la batería, la vida útil y la eficiencia de la batería se reducen significativamente, por lo que el estado de carga SOC debe limitarse para garantizar un funcionamiento seguro de la batería ($SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$). La capacidad de almacenamiento de la batería se puede calcular de acuerdo con la ecuación (20).

$$C_n = \frac{\text{Demanda energía} * \text{Días de autonomía}}{V_{sistema} * DOD} \quad (20)$$

Donde C_n es la capacidad nominal del banco de baterías y DOD es la profundidad de descarga, para las baterías de litio se consideró una profundidad de descarga de 90%.

2.5 Generador Diésel

El generador lo compone un motor de combustión interna y un generador. Debe estar operando entre 80 y 90% de su potencia nominal con el fin de garantizar la máxima eficiencia del generador. Por lo que la potencia del generador diésel se estima a partir de la potencia de la demanda. El consumo de combustible del generador diésel depende de la potencia nominal y la potencia de salida real suministrada por este. El consumo de combustible del generador diésel FG en l/h se da con la ecuación (21) [12].

$$F_G = B * P_{N-G} + A * P_{G-out} \quad (21)$$

Donde P_{N-G} es la potencia nominal en kW, P_{G-out} es la potencia de salida del generador diésel, A y B son los coeficientes de la curva de consumo en l/kWh. $A = 0,246$ l/kWh y $B = 0,08145$ l/kWh.

2.6 Escenario de operación

De acuerdo con [58] se debe evitar que un generador diésel trabaje a una carga inferior al 30% de su potencia nominal, ya que esto reduce su vida útil. Por lo anterior, el generador diésel solo entra en funcionamiento, si la potencia requerida es mayor al 30% de su potencia nominal P_g como lo muestra la Figura 3. Si la energía de requerida por la carga no se suple completamente por las fuentes renovables y el requerimiento de potencia no es mayor al 30% de la potencia nominal del generador P_g , las baterías entran a suplir la carga.

2.7 Análisis económico

El análisis económico del sistema híbrido utilizado en este trabajo se basa en la utilización del costo nivelado de la energía LCOE, el cual incluye todos los costos a lo largo de la vida útil del proyecto: la inversión inicial, operación y mantenimiento, el costo de combustible, costo de capital, entre otras, y se calcula con la ecuación (22).

$$LCOE = \frac{\text{Costo inversión} * CFR + \text{Costo OyM anual} + \text{Costo Comb anual}}{\text{Generación de energía anual}} \quad (22)$$

CRF es el factor de recuperación de capital, y es calculado con la ecuación (23). Donde i es la tasa de interés y n es la vida útil del sistema.

$$CFR = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (23)$$

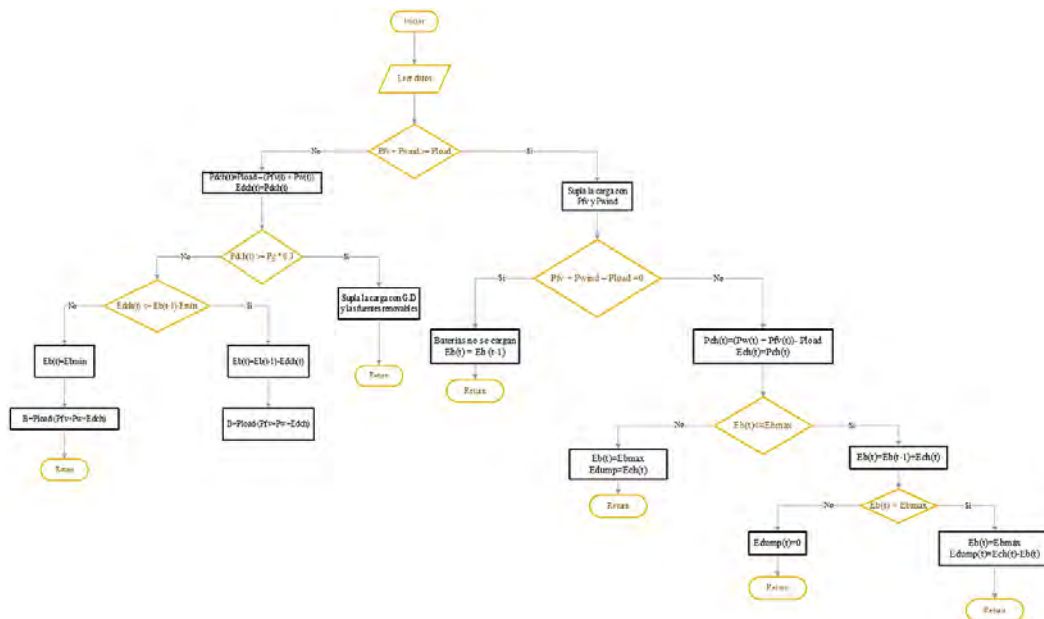


Figura 3. Diagrama de flujo para la operación del sistema Fotovoltaica-Eólica-Baterías- Generador

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Estudio de caso

El estudio se realizó para Institución Etnoeducativa rural Majayütpana, ubicada en Uribia, departamento de la Guajira. Los datos de irradiación solar fueron tomados de la estación meteorológica del Apto. Almirante Padilla suministrados por el IDEAM [13], en la Tabla 1 se presentan horas de sol pico (HSP) en base a los promedios de irradiación solar de cada mes.

Tabla 1. Promedio mes día de irradiación solar y HSP

ATLAS IDEAM		
Mes	Promedio Mes (Wh/m ² /mes)	HSP
Enero	197,37	6,58
Febrero	220,25	7,34
Marzo	226,97	7,57
Abril	219,06	7,30
Mayo	230,03	7,67
Junio	259,71	8,66
Julio	250,40	8,35
Agosto	252,00	8,40
Septiembre	239,96	8,00
Octubre	200,72	6,69
Noviembre	182,49	6,08
Diciembre	190,48	6,35
Promedio	222,45	7,42

En la Tabla 1 se evidencia que el mes con menor disponibilidad del recurso solar es noviembre con un valor de 182,49 Wh/m² y 6,08 HSP, y el mes con mayor disponibilidad corresponde al mes junio con 259,71 Wh/m² y 8,6 HSP. Los datos del recurso eólico se obtuvieron del Nuevo Atlas de Viento de Colombia [14] y de datos meteorológicos proporcionados por la NASA. La Figura 4 muestra la velocidad promedio del viento para una altura de 10 m.

La distribución de la demanda energética se realizó con base a los principales requerimientos de la comunidad de Majayütpana. La Figura 5 se muestra la curva de la demanda energética estimada. Se simuló el sistema híbrido para un periodo de 8760 horas mediante una rutina desarrollada en Matlab, para determinar la viabilidad de implementación de este tipo de sistemas en zonas no interconectadas. En las Tablas 3 y 4, se presentan los datos técnicos de las tecnologías utilizadas en el sistema híbrido y parámetros económicos del proyecto, respectivamente.

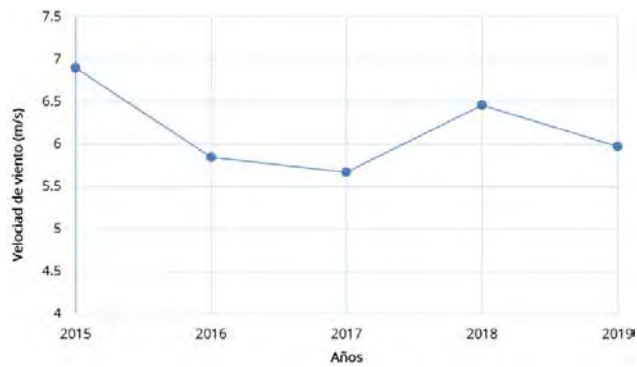


Figura 4. Comportamiento de la velocidad promedio del viento



Figura 5. Comportamiento promedio de la demanda durante un día

Tabla 3. Datos técnicos de las tecnologías

Componente	Parámetros de Simulación	
Panel Solar	Potencia Panel [W]	540
	Potencia Inversor [W]	3000
	Eficiencia Panel [%]	21,1
	Eficiencia Inversor [%]	93
	Coefficiente de temperatura [%/°C]	-0,36
	TNOCT [°C]	45
	Área del módulo [m ²]	2,58
Aerogenerador	Potencia [kW]	1,5
	Velocidad para arranque [m/s]	3,5
	Velocidad para Pnominal [m/s]	12
	Velocidad para frenado [m/s]	14
	Coefficiente de potencia	0,45
	Potencia [kW]	5
	Velocidad para arranque [m/s]	3
Baterías OPzV	Velocidad para Pnominal [m/s]	12
	Velocidad para frenado [m/s]	14
	Coefficiente de potencia	0,4
Baterías Litio	Altura del buje [m]	10
	Capacidad Nominal C ₂₄ [Ah]	1785
	Tensión de la batería [V]	12
Baterías Litio	DOD [%]	50
	Capacidad Nominal [Ah]	74
Baterías Litio	Tensión de la batería [V]	48
	DOD [%]	90%
Generador Diésel	Potencia [kW]	2,8

Tabla 4. Parámetros económicos de la instalación del proyecto

Componente	Parámetros de Costos	
Panel Solar	Potencia [W]	540
	Costo Módulo [USD]	266
	Costo Inversor [USD]	682
	Vida útil Panel [Años]	25
	Vida útil Inversor [años]	10
	O&M [USD/kW]	17,8 - 9
	Equipos mecánicos [USD]	40

Aerogenerador	Vida útil [años]	25
	Costo aerogenerador 1.5 kW [USD]	4656,35
	Costo aerogenerador 5 kW [USD]	9383
	Cableado e Instalación [USD]	40
	Operación y mantenimiento [USD]	3%
Generador Diésel	Vida útil [horas]	15000
	Costo GD 2.8 kW [USD]	793,47
	Costo GD 5 kW [USD]	1242,5
	Operación y mantenimiento [USD /kWh]	40
	Costo combustible [USD/L]	0,48
Baterías OPzV	Vida útil [años]	8
	Costo Batería [USD]	6531
	Operación y mantenimiento [USD]	0
Baterías Litio	Vida útil [años]	16
	Costo Batería [USD]	1812,3
	Operación y mantenimiento [USD]	0
Parámetros Económicos	Ciclo de vida del proyecto [años]	25
	Tasa de descuento [%]	8
	Tasa esperada de inflación [%]	4,51

3.2 Simulación del sistema para el periodo de un año

El 70% de la carga es suplida por el sistema fotovoltaico y el 30% por el aerogenerador. Las baterías están dimensionadas solo para suplir las cargas esenciales de la institución que es aproximadamente a un 50% de la demanda total y el generador diésel supl el 50% restante de la demanda. La Tabla 5 muestra la energía generada por el sistema híbrido y el costo nivelado de la energía. Se observa que el mayor costo en la energía de energía esta dado por el generador diésel el cual es de 0,66 UDS/kWh, esto se debe al costo del combustible que es de aproximadamente de 0,48 UDS/L. El costo nivelado total del sistema híbrido es de 1.7897 USD/kWh, este valor seda porque es un sistema que supl una carga pequeña 10066,07 MWh/año, para sistemas de mayor demanda estos costos nivelados de energía son menores.

Tabla 5. Resultados de simulación del sistema híbrido

LCOE WIND [USD/kWh]	0,5421
LCOE FV [USD/kWh]	0,5032
LCOE GD [USD/kWh]	0,6600
LCOE BAT [USD/kWh]	0,0843
LCOE TOTAL [USD/kWh]	1,7897
Generación Total G.D [MWh/año]	1977,2576
Generación Total FV [MWh/año]	7827,4955
Generación Total Eólica [MWh/año]	2269,5091
Demanda de Energía de la Carga [MWh/año]	10066,70

3.3 Desempeño del sistema híbrido para un día

La Figura 6 muestra el comportamiento del sistema híbrido a lo largo de las 24 horas del día. Se puede observar que el sistema fotovoltaico supl carga junto con generador eólico de las 7 a 15 horas, de las 15 a 17 horas, la demanda es suplida por el sistema fotovoltaico, generador eólico y baterías. Entre las 17 y 23 horas la carga es suplida por el generador diésel y el generador eólico. Las baterías supl la energía en horario de 15 a 24 h y el generador eólico entre 24h y 7 h.

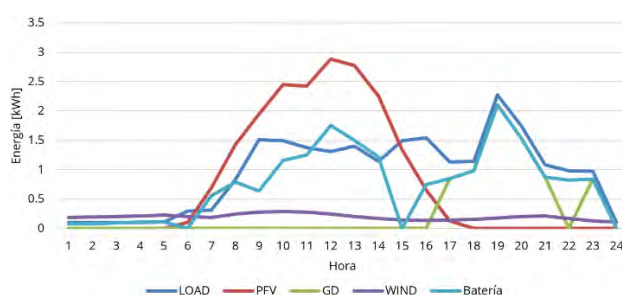


Figura 6. Comportamiento del sistema híbrido

4. CONCLUSIONES

Se desarrollo la simulación de un sistema hibrido PV-Eólica-Diesel-Batería para suplir la demanda de la institución etnoeducativa rural Majayütpana ubicada en Uribia, la Guajira, para determinar qué tan viable la implementación de este tipo de sistemas en zonas no interconectadas.

Se evidencio mediante los resultados de operación del sistema, que el costo nivelado del sistema fue de 1,7897 USD/kWh, lo que hace inviable la implementación del sistema, esto se debe al alto costo del aerogenerador y del generador diésel.

Observado el compartimiento de operación de cada una de las fuentes y la generación de energía de las mismas, se puede deducir que un sistema fotovoltaico-baterías seria la opción más viable para este estudio de costo, teniendo un costo nivelado aproximado de 0,543 UDS/kWh.

En los resultados también evidencia que el mayor costo de la generación de energía, está dado por el generador diésel el cual es de 0,66 UDS/kWh, esto se debe al costo del combustible que es de aproximadamente de 0,48 UDS/L (dato referenciado al 2021).

REFERENCIAS

- [1] Anoune K. et al. (2018). Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, 652–673.
- [2] Altun A. and Kilic M. (2020). Design and performance evaluation based on economics and environmental impact of a PV-wind-diesel and battery standalone power system for various climates in Turkey. *Renew Energy* 157, 424–443.
- [3] Shayeghi H. et al. (2021). Assessing hybrid supercapacitor-battery energy storage for active power management in a wind-diesel system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 125.
- [4] Boucekara H. et al. (2021). Decomposition based multiobjective evolutionary algorithm for PV/Wind/Diesel Hybrid Microgrid System design considering load uncertainty. *Energy Reports* 7, 52–69.
- [5] Das B. et al. (2021). Feasibility and techno-economic analysis of stand-alone and grid-connected PV/Wind/Diesel/Batt hybrid energy system: A case study. *Energy Strategy Reviews* 37.
- [6] Maheri A. et al. (2022). Multiobjective optimisation of hybrid wind-PV-battery-fuel cell-electrolyser-diesel systems: An integrated configuration-size formulation approach. *Energy* 241.
- [7] Kumar P. (2022). Optimization and techno-economic analysis of a solar photo-voltaic/biomass/diesel/battery hybrid off-grid power generation system for rural remote electrification in eastern India. *Energy* 247.
- [8] Abbes D. et al. (2014). Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems. *Math. Comput. Simul.* 98, 46–62, 2014.
- [9] Luque A. y Hegedus S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.
- [10] Wang L. y Singh C. (). PSO-based multi-criteria optimum design of a grid-connected hybrid power system with multiple renewable sources of energy. Press.
- [11] Bueno M. (2020). Sistema de control para aerogeneradores empleando lógica difusa. Recuperado: <http://nautilus.uaz.edu.mx/difu100cia>
- [12] Bukar A. et al. (2019). Optimal sizing of an autonomous photovoltaic/wind/battery/diesel generator microgrid using grasshopper optimization algorithm. *Solar Energy* 188, 685–696.
- [13] Atlas. (2022). Atlas Interactivo - Radiación IDEAM. Recuperado: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- [14] Atlas. (2022). Atlas Interactivo - Vientos - IDEAM. Recuperado: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

Evaluación de los estándares ASTM D877 y ASTM D1816 para determinar la tensión de ruptura dieléctrica a frecuencia industrial en aceites aislantes

Fabio Alfonso González¹

Michael Arenas Flórez²

Alonso de Jesús Retamoso Llamas³

Ángel Octavio Sandoval Pinzón⁴

Julián Andrés Caicedo López⁵

César Augusto Cristancho Franco⁶

Unidades Tecnológicas de Santander
Colombia

Las pruebas de rigidez dieléctrica son un método para determinar el valor de tensión disruptiva de aceites aislantes, un dato importante que indica la presencia de agentes contaminantes que alteran sus capacidades dieléctricas. Actualmente, se aplica la normativa correspondiente a los estándares ASTM D1816 y ASTM D877, que define la metodología para realizar pruebas de rigidez dieléctrica a aceites aislantes variando la forma de los electrodos y las condiciones de las pruebas. En este trabajo se presenta el resultado comparativo de pruebas de ruptura dieléctrica en líquidos aislantes en el laboratorio de alta tensión de las Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, de acuerdo con estos estándares, que definen los requerimientos para realizar las pruebas de rigidez dieléctrica. Se realizaron pruebas experimentales con muestras de aceites con características heterogéneas y variación de contaminantes, determinando la incidencia de estas condiciones en la capacidad de ruptura de los líquidos aislantes. Los resultados muestran que, al medir la tensión de ruptura en aceites usados debido a la separación de electrodos, el estándar ASTM D877 sobrestima la tensión de ruptura considerablemente respecto al estándar ASTM D1816. En todos los casos se destaca la importancia de realizar mediciones frecuentes a aceites debido a que las impurezas pueden modificar sustancialmente su característica dieléctrica.

¹ Magíster en Potencia Eléctrica.

Contacto: fagonzalez@correo.uts.edu.co

² Magister en Ingeniería Eléctrica.

Contacto: marenasf@correo.uts.edu.co

³ Magíster en Potencia Eléctrica.

Contacto: alonsoretamoso@correo.uts.edu.co

⁴ Ingeniero Electricista.

Contacto: aosandoval@uts.edu.co

⁵ Ingeniero Electricista.

Contacto: jandrescaicedo@uts.edu.co

⁶ Ingeniero Electricista.

Contacto: ccristancho@uts.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las pruebas de rigidez dieléctrica permiten determinar un valor numérico de tensión disruptiva de aceites aislantes, lo cual es un parámetro de importancia dado que indica la presencia de agentes contaminantes tales como agua, suciedad, fibras celulósicas o partículas que alteran las capacidades dieléctricas de dichos líquidos [1]. Un valor bajo de tensión de ruptura dieléctrica puede considerarse como sospecha de altos índices de factores contaminantes y junto con otros ensayos permiten determinar el estado del aceite aislante [2-4].

La rigidez dieléctrica, también conocida como tensión de ruptura, es uno de los parámetros cruciales que se deben monitorear para conocer el estado de salud de transformadores eléctricos [5]. La tensión de ruptura dieléctrica indica la capacidad del líquido aislante para soportar la tensión eléctrica sin fallar [6].

Los estándares ASTM D877 y ASTM D1816 tienen bien definida la metodología para realizar pruebas de rigidez dieléctrica a aceites aislantes variando la forma de los electrodos y las condiciones de las pruebas. Se ha encontrado que un valor alto de tensión disruptiva no indica la ausencia de agentes externos contaminantes, sino que puede simplemente indicar que las concentraciones de contaminantes presentes en el líquido entre los electrodos no son lo suficientemente grandes como para afectar negativamente el voltaje de ruptura promedio del líquido cuando se experimenta con este método de prueba [7, 8].

Verificar el estado de aceites aislantes es de suma importancia para garantizar el buen funcionamiento de los equipos, alargar su vida útil y evitar accidentes que puedan causar fallas y consiguas pérdidas económicas y humanas [9]. Es por esto que se deben hacer pruebas de rigidez dieléctrica de manera periódica para realizar un seguimiento de las propiedades dieléctricas de dichos líquidos aislantes [10].

En este trabajo se evalúan los estándares ASTM D877 (electrodos tipo disco) [11] y ASTM D1816 (electrodos tipo hongo) [12] considerando los equipos y procedimientos recomendados para determinar el voltaje de ruptura en cuatro tipos de aceite: vegetal, de transformador nuevo y dos tipos de aceite de transformador.

2. MÉTODO

La presente investigación es de tipo correlacional ya que se evalúa la relación entre los contaminantes de aceites aislantes y su propiedad dieléctrica, asimismo se tiene un enfoque cuantitativo dado que se recolectaron y analizaron datos numéricos medidos de tensiones disruptivas de los aceites al variar la forma de los electrodos y la distancia entre ellos. Se utilizó la técnica de experimentación puesto que se construyó un montaje para realizar pruebas de rigidez dieléctrica a partir los estándares ASTM D1816 (electrodos tipo hongo) y ASTM D877 (electrodos tipo disco), los cuales definen los requerimientos para realizar dichas pruebas.

Para realizar la pruebas de rigidez dieléctrica el estándar ASTM D877 [11] establece el alcance para medidas en líquidos tales como aceites de petróleo, hidrocarburos, ésteres naturales y sintéticos y askarels PCB, utilizados como líquidos aislantes y refrigerantes en transformadores, cables y equipos similares. La tensión de prueba debe ser en corriente alterna en una frecuencia en el rango de 45 a 65 Hz, la temperatura para la prueba debe ser ambiental (20 a 30 °C), se debe utilizar una tasa de incremento de tensión de 3kV/s \pm 5%, el espaciado entre los electrodos a utilizar debe ser de 2,54 mm, se deben realizar 5 rupturas y la media de estos 5 datos se considera como el valor de ruptura dieléctrica de la muestra.

Así mismo el estándar ASTM D1816 [12] define el alcance para medidas en líquidos tales aceites de petróleo fluidos de silicona, aceites aislantes eléctricos, fluidos de éster sintético y fluidos de éster natural este método es aplicable a los líquidos aislantes de uso común en cables, transformadores, disyuntores de aceite y aparatos similares como medio aislante y refrigerante. La tensión de prueba debe ser en corriente alterna en una frecuencia en el rango de 45 a 65 Hz, la temperatura para la prueba debe ser ambiental (20 a 30 °C), se debe utilizar una tasa de incremento de tensión de 0,5kV/s \pm 3%, el espaciado entre los electrodos a utilizar debe ser de 1-2 mm, se deben realizar 5 rupturas y la media de estos 5 datos se considera como el valor de ruptura dieléctrica de la muestra.

La Tabla 1 presenta un resumen de las características del procedimiento de medición de tensión de ruptura dieléctrica según los estándares ASTM D877 y ASTM D1816.

Tabla 1. Comparación de los estándares ASTM D877 y ASTM D1816 [13]

Característica	ASTM D-877	ASTM D-1816
Geometría de los electrodos	Discos de 25mm	Semiesféricos de 36mm
Separación (mm)	2,5	1
Rampa (V/s)	3000	500
Alcance en kV	<69	30 – 50
Sensibilidad a la humedad (ppm)	30 – 80	80 – 90
Aplicación recomendada Según ASTM	Aceites nuevos	Aceites en operación, filtrados, desgasificados y deshidratados
Sensibilidad a fibras de celulosa	Menos sensible	Más sensible

Los métodos ASTM D1816 y ASTM D877 se consideraron con el fin de determinar las características del montaje experimental tales como, condiciones de prueba, separación de electrodos y velocidad de incremento de voltaje. Para la realización de las pruebas se utilizó la unidad High Volt HICO Basic con panel de operador TP900 [14] (Figura 1) la cual permite realizar pruebas de alta tensión CA, CC y de impulso y gestionar el proceso a través del software High Volt, asimismo permite la adquisición y presentación de datos de medición de prueba en tiempo real.



Figura 1. Unidad High Volt HICO Basic

Considerando las recomendaciones del fabricante High Volt se construyó el recipiente para disposición de los líquidos aislantes en el desarrollo de las pruebas. El recipiente posee las siguientes dimensiones de 140*100*110 mm con una capacidad de 1500 ml, peso de 0,5 kg, basado en las medidas de la copa de prueba del fabricante, para su construcción se utilizó acrílico cristal de 5mm el cual se termoformó para llegar a la configuración deseada del envase (Figura 2).



Figura 2. Recipiente construido para la realización de pruebas de tensión disruptiva

Los electrodos empleados se construyeron con base a las especificaciones de los estándares ASTM D1816 para tipo hongo (VDE) y ASTM D877 par tipo plano (disco) como se aprecian en las Figuras 3 y 4.



Figura 3. Electrodos construidos bajo las especificaciones del estándar ASTM D877



Figura 4. Electrodo construido bajo las especificaciones del estándar ASTM D1816

El montaje de las pruebas está integrado por un regulador de tensión o módulo de control, un transformador elevador, un divisor de tensión, un voltímetro y una copa de prueba que contiene el aceite a probar y tiene integrados un par de electrodos a los cuales se les aplica el voltaje en alta tensión. El diagrama esquemático de los equipos usados en la prueba se ilustra en la Figura 5.

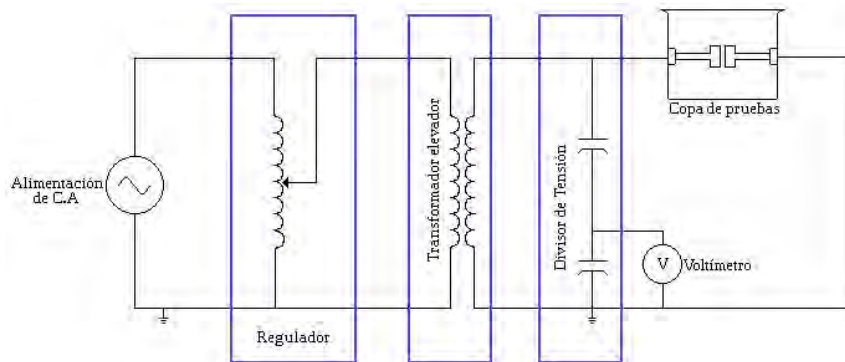


Figura 5. Diagrama esquemático de los equipos usados durante las pruebas

El regulador de tensión permite incrementar el voltaje de manera gradual y automática además es posible definir límites de tensión a la prueba y la velocidad con la que se incrementa el voltaje, el cual depende del estándar que se utilice para realizar la prueba.

El transformador elevador permite obtener el voltaje de alta tensión necesario para provocar el arco eléctrico en el aceite. Su voltaje de salida varía entre 0 y 100 kV. El divisor de voltaje sirve para reducir el voltaje de alta tensión a valores manejables por un voltímetro de baja tensión y así poder medir el voltaje al cual se produce el arco eléctrico.

Una vez realizadas las pruebas, se validaron los resultados haciendo su análisis respectivo con el fin de definir las características disruptivas de los aceites estudiados.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la implementación de las pruebas de rigidez dieléctrica se emplearon aceites de transformadores y aceites de cocina vegetal. En cuanto a los aceites de transformadores, se seleccionaron una muestra de aceite nuevo y dos muestras de aceites usados diferentes. La Figura 6, muestra los tipos de aceites empleados.

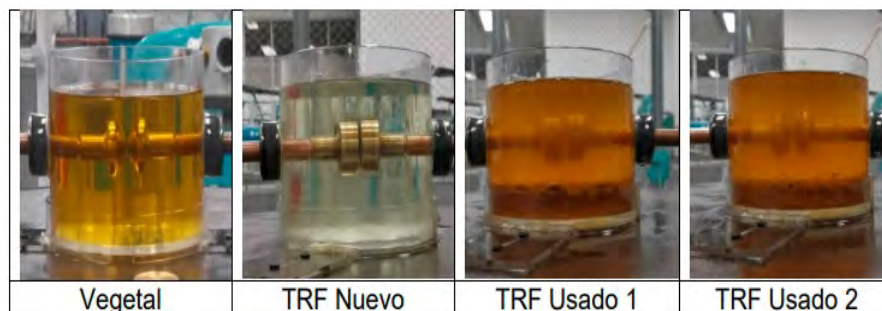


Figura 6. Tipos de aceite empleados en las pruebas de rigidez dieléctrica

En las Tablas 2 y 3 se describen los datos técnicos de los aceites dieléctrico y vegetal con información sobre usos, componentes y propiedades físicas y químicas, que permiten caracterizar a este tipo de aceite.

Tabla 2. Datos técnicos aceite dieléctrico

Identificación del producto	
Nombre Químico	Aceite Lubricante
Sinónimos	Aceite para transformadores, interruptores, cajas de contacto y todo sistema, Electrificado en baño de aceite, mezcla compleja de hidrocarburos y aditivos.
Composición, información sobre los componentes	
Aceite mineral parafínico con inhibidor de oxidación. Formulación compleja de Hidrocarburos saturados con un número de carbonos dentro del intervalo de C15 – C50.	
Propiedades físicas y químicas	
Aspecto	Líquido aceitoso
Color	1 máx. (ASTM D – 1500)
Olor	Lubricante
Intervalo de ebullición	Mayor 400 °C (ASTM D – 1160)
Punto de inflamación/inflamabilidad	140 °C mín. (ASTM D – 92)
Punto de combustión	160 °C mín. (ASTM D – 92)
Presión de vapor	Menor 0.1 mm Hg a 25 °C
Densidad	0,851 g/cm ³ típico a 15 °C (ASTM D – 4052)
Hidrosolubilidad	insoluble
Solubilidad	En disolventes orgánicos
Punto de congelación	- 21 °C máx. (ASTM D – 97)

Tabla 3. Datos técnicos aceite vegetal

Identificación del producto	
Nombre Químico	Aceite Lubricante
Composición, información sobre los componentes	
Aceite líquido vegetal totalmente refinado, blanqueado, Desodorizado a partir de aceite crudo de girasol winterizado	
Propiedades físicas y químicas	
Aspecto	Líquido viscoso
Color	Amarillo claro
Olor	Característico
Índice de peróxidos (meq/kg)	5 máx
% ácidos grasos libres (OLEICO)	0,05 máx
% Humedad y material volátil	0,1 máx
% Impurezas	0
Índice de Yodo	119 – 138

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la prueba de rigidez dieléctrica realizada al aceite vegetal según los estándares ASTM D877 y ASTM D1816. La primera columna corresponde al estándar empleado, la segunda al número de prueba realizada, la tercera a la corriente de falla, la cuarta a la tensión disruptiva del aceite, la quinta a la tensión pico alcanzada y la sexta a la corriente límite ajustada en el equipo.

Tabla 4. Mediciones hechas con el aceite vegetal

	Prueba	Corriente out (A)	Tensión de ruptura (Kv)	Tensión pico (Kv)	Corriente lim (mA)
ASTM D1816	1	20	11,24	11,24	10
	2	20	7,93	7,93	10
	3	24	8,19	8,19	10
	4	33	11,41	11,41	10
	5	34	12,07	12,07	10
ASTM D877	1	21	18,77	18,77	10
	2	36	15,53	15,53	10
	3	37	20,00	20,00	10
	4	22	20,74	20,74	10
	5	19	20,59	20,59	10

La corriente máxima alcanzada para las pruebas bajo el estándar ASTM D1816 es equivalente a 34 A, mientras que para el estándar ASTM D877 alcanza un valor de 36 A. Para analizar los datos obtenidos se presenta en la Figura 7 el diagrama de cajas y bigotes para los dos estándares empleados en las cuales la

variable estudiada corresponde a la tensión disruptiva. El límite inferior de la caja corresponde al primer cuartil (Q_1) y el límite superior al tercer cuartil (Q_3), logrando que la caja represente el 50% central de las puntuaciones de la variable, sin el 25% más pequeño y el 25% más alto. La línea entre la caja es la mediana o segundo cuartil (Q_2) que indica el valor central de la variable, el símbolo X representa la media y las líneas horizontales o bigotes delimitan los valores máximos y mínimos de la variable.

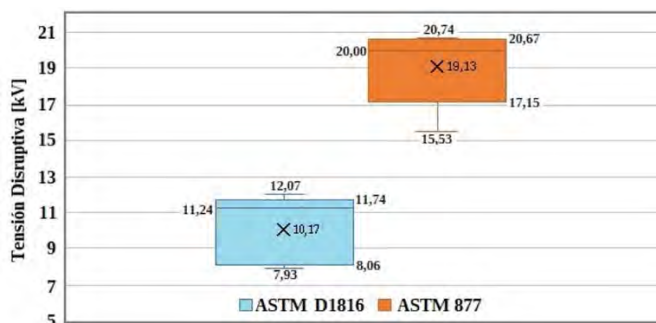


Figura 7. Diagrama de cajas y bigotes de tensiones disruptivas del aceite vegetal

Para este caso se obtuvo una media de 10,17 kV para electrodos tipo hongo y de 19,13 kV para electrodos planos y una mediana de 11,74 kV y 20,00 kV respectivamente. Se observa que los valores de tensión disruptiva obtenidos mediante el estándar ASTM D877 son mayores a los del estándar ASTM D1816 y que para ambos casos la media es menor que la mediana, lo que indica que la distribución está sesgada a la izquierda y que los valores distantes son pequeños como lo indica el tamaño del segundo cuartil en ambas cajas. Para los casos en que se presenta este sesgo se recomienda usar la mediana. También se observa que los datos presentan poca dispersión, como se ve en el pequeño tamaño de la caja.

La Tabla 5 presenta los resultados de la prueba de rigidez dieléctrica realizada al aceite de transformador nuevo según los estándares ASTM D877 Y ASTM D1816.

Tabla 5. Mediciones para el aceite de transformador nuevo

	Prueba	Corriente out (A)	Tensión de ruptura (Kv)	Tensión pico (Kv)	Corriente lim (mA)
ASTM D1816	1	9	6,97	6,97	10
	2	7	7,73	7,73	10
	3	6	6,41	6,41	10
	4	4	6,20	6,20	10
	5	10	6,40	6,40	10
ASTM D877	1	13	16,91	16,91	10
	2	22	13,90	13,90	10
	3	4	12,97	12,97	10
	4	19	18,17	18,17	10
	5	28	17,66	17,66	10

Para los electrodos tipo hongo se obtuvo un valor máximo de corriente en el primario de 10 A y para el tipo plano de 28 A. Estos valores son menores a los registrados en la prueba con aceite vegetal, así como los valores de tensión disruptiva. La Figura 8 presenta el diagrama de cajas y bigotes para ambas pruebas realizadas de acuerdo con los estándares empleados.

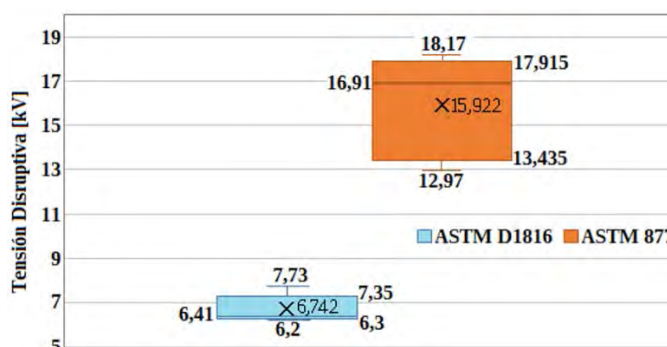


Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes de tensiones disruptivas del aceite de transformador nuevo

Según la figura anterior, los valores de tensión disruptiva usando electrodos planos superan a los obtenidos con electrodos tipo hongo, la diferencia radica en los tamaños de las dos cajas, es decir, la dispersión de los datos presentados por las pruebas con los estándares ASTM D1816 y ASTM D877 difieren en gran medida. Para el caso de los electrodos tipo hongo la media supera a la mediana, luego hay un sesgo positivo o a la derecha y para los electrodos planos la mediana supera a la media luego ocurre un comportamiento contrario o sesgo negativo.

Estas diferencias pueden presentarse debido al cambio de forma de los electrodos puesto que el campo eléctrico varía de acuerdo con la distribución volumétrica y además a la posible presencia de humedad en el aceite sujeto a prueba. Se obtuvo una media de 6,74 kV para electrodos tipo hongo y de 15,92 kV para tipo plano y una mediana de 6,41 kV y 16,91 kV respectivamente.

Con el fin de analizar la influencia de las partículas de suciedad en las mediciones de tensión disruptiva, se realiza una prueba con aceite de transformador usado como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Mediciones para el aceite de transformador usado

	Prueba	Corriente out (A)	Tensión de ruptura (Kv)	Tensión pico (Kv)	Corriente lim (mA)
ASTM D1816	1	31	4,85	5,63	10
	2	30	3,96	7,61	10
	3	30	5,65	2,09	10
	4	29	5,95	6,08	10
	5	16	6,30	2,79	10
ASTM D877	1	13	6,35	6,35	10
	2	13	7,05	7,05	10
	3	4	6,97	6,97	10
	4	6	10,14	10,14	10
	5	7	12,02	12,02	10

Para los electrodos tipo hongo se obtuvo un valor máximo de corriente de 31 A y para los electrodos tipo plano un valor máximo de 13 A. Cabe resaltar que, para la prueba de rigidez dieléctrica, se registraron valores mucho más bajos en comparación con las pruebas anteriores debido a las partículas de suciedad presentes y al tiempo de uso del aceite factores que inciden en la pérdida de las propiedades aislantes del mismo. En la Figura 9 se muestra el diagrama de cajas y bigotes de tensiones disruptivas del aceite de transformador usado.

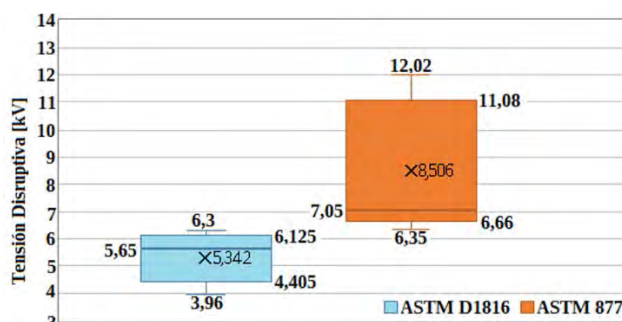


Figura 9. Diagrama de cajas y bigotes de tensiones disruptivas del aceite de transformador usado 1

Se evidencia que las tensiones disruptivas usando electrodos planos (estándar ASTM D877) guardan el mismo comportamiento que en las pruebas con aceites anteriores ya que toman valores mayores a los obtenidos usando los electrodos tipo hongo (estándar ASTM D1816) con una notoria diferencia en la distribución de los datos, ya que para los electrodos tipo plano se presenta una mayor dispersión mostrada por el pronunciado tamaño de la caja.

De acuerdo con las mediciones se obtuvo una media de 5,34 kV para electrodos tipo hongo y de 8,51 kV para electrodos planos y una mediana de 5,65 kV y 7,05 kV respectivamente, menores a las obtenidas usando como prueba aceite de transformador nuevo. Así mismo se encontró que para el estándar ASTM D1816 los datos presentan un sesgo negativo (media menor que la mediana) y para el ASTM D877 un sesgo positivo (media mayor que la mediana).

En la Tabla 7 se presentan los resultados de tensiones disruptivas para un segundo aceite de transformador usado.

Tabla 7. Mediciones para el aceite de transformador usado 2

	Prueba	Corriente out (A)	Tensión de ruptura (Kv)	Tensión pico (Kv)	Corriente lim (mA)
ASTM D1816	1	6	5,51	5,51	10
	2	14	5,72	5,72	10
	3	11	5,66	5,66	10
	4	8	6,35	6,35	10
	5	5	5,49	5,49	10
ASTM D877	1	3	5,47	5,47	10
	2	6	6,46	6,46	10
	3	2	10,87	10,87	10
	4	3	7,02	7,02	10
	5	3	7,69	7,69	10

Es importante resaltar que las corrientes de falla en la prueba fueron menores a las pruebas de aceites anteriores (usado 1, nuevo y vegetal) con valores de 5 A para electrodos tipo hongo y de 2 A para electrodos tipo plano. Así mismo las tensiones disruptivas son comparables a las obtenidas con el aceite de transformador usado 1 pero menores a las registradas con el aceite de transformador nuevo y el aceite vegetal. Cabe resaltar que, a la vista el aceite presentaba menos partículas contaminantes y por esta razón se explica el haber alcanzado valores mayores de tensión disruptiva en contraste con el aceite de transformador usado 1 (Figura 10).

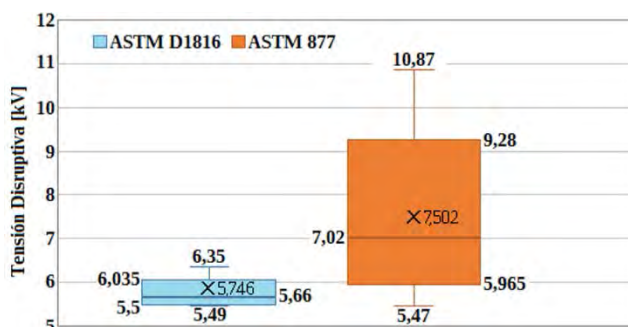


Figura 10. Diagrama de cajas y bigotes de tensiones disruptivas del aceite de transformador usado 2

Se evidencia que las tensiones disruptivas obtenidas con los electrodos tipo plano, resultaron mayores a las medidas usando electrodos tipo hongo. El comportamiento descrito, se presentó en todos los aceites estudiados en el experimento y es un aspecto importante a tener en cuenta. De igual manera se observa una mayor dispersión en los datos obtenidos mediante el estándar ASTM D877 como lo muestra el tamaño de la caja en comparación con el tamaño de la caja con que se diagraman los datos tomados mediante el estándar ASTM D1816.

En la Tabla 8, se realiza la comparativa entre las pruebas de las diferentes muestras de aceites empleando el estándar ASTM D1816, evidenciando que el aceite vegetal (Figura 11) al tener menor presencia de agentes contaminantes debido a la correcta manipulación y obtención de la muestra posee un mayor voltaje de ruptura en comparación a los demás líquidos aislantes empleados para las pruebas analizadas en el estudio.

Tabla 8. Comparativa de pruebas de aceite en el estándar ASTM D1816

Líquido	Prueba	Corriente OUT (A)	Tensión de ruptura (kV)	Tensión pico (kV)	Corriente LIM (mA)	Promedio de tensión disruptiva (kV)	Límite inferior	Valor máximo
ASTM D1816	1	20	11,24	11,24	10	10,168	7,93	12,07
	2	20	7,93	7,93	10			
	3	24	8,19	8,19	10			
	4	33	11,41	11,41	10			
	5	34	12,07	12,07	10			

Aceite de trans- formado nuevo	1	9	6,97	6,97	10	6,742	6,2	7,73
	2	7	7,73	7,73	10			
	3	6	6,41	6,41	10			
	4	4	6,2	6,2	10			
	5	10	6,4	6,4	10			
Aceite usado 1	1	31	4,85	5,63	10	5,342	3,96	6,3
	2	30	3,96	7,61	10			
	3	30	5,65	2,09	10			
	4	29	5,95	6,08	10			
	5	16	6,3	2,79	10			
Aceite usado 2	1	6	5,51	5,51	10	5,746	5,49	6,35
	2	14	5,72	5,72	10			
	3	11	5,66	5,66	10			
	4	8	6,35	6,35	10			
	5	5	5,49	5,49	10			

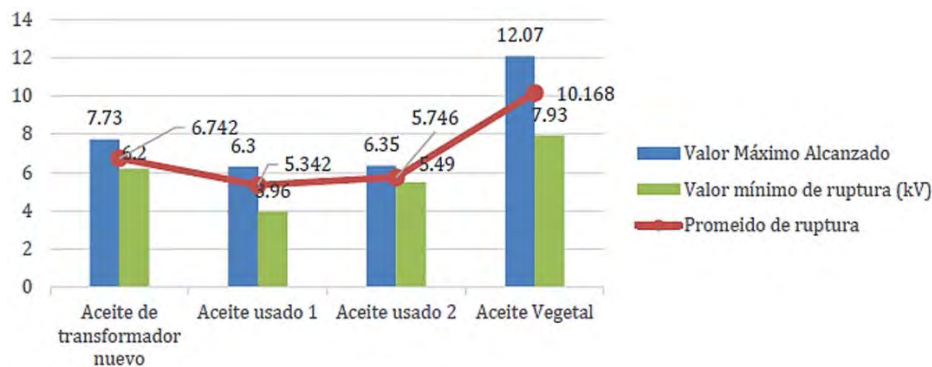


Figura 11. Gráfica de valores promedio vs valores máximos y mínimos basados en el estándar ASTM D1816

Para el estándar ASTM D1816, la media está muy cercana a la mediana, luego se puede afirmar que los datos se acercan a una distribución simétrica, comportamiento que no se presenta en las pruebas bajo el estándar ASTM D877 dado que la media supera a la mediana y por tanto hay un sesgo positivo a la derecha.

En la Tabla 9, se realiza la comparativa entre las pruebas de las diferentes muestras de aceites empleando el estándar ASTM D877, evidenciando una mayor dispersión de datos en cada una de ellas (Ver Figura 12) debido a la menor precisión que posee este estándar en comparación con el ASMT D1816.

Tabla 9. Comparativa de pruebas de aceite en el estándar ASTM D877

Líquido	Prueba	Corriente OUT (A)	Tensión de ruptura (kV)	Tensión pico (kV)	Corriente LIM (mA)	Promedio de Tensión Disruptiva (kV)	Límite inferior	Valor máximo
Aceite vegetal	1	21	18,77	18,77	10	19,126	15,53	20,74
	2	36	15,53	15,53	10			
	3	27	20	20	10			
	4	22	20,74	20,74	10			
	5	19	20,59	20,59	10			
Aceite de trans- formado nuevo	1	13	16,91	16,91	10	15,922	12,97	18,17
	2	22	13,9	13,9	10			
	3	4	12,97	12,97	10			
	4	19	18,17	18,17	10			
	5	28	17,66	17,66	10			
Aceite usado 1	1	13	6,35	6,35	10	8,506	6,35	12,02
	2	13	7,05	7,05	10			
	3	4	6,97	6,97	10			
	4	6	10,14	10,14	10			
	5	7	12,02	12,02	10			
Aceite usado 2	1	3	5,47	5,47	10	7,502	5,47	10,87
	2	6	6,46	6,46	10			
	3	2	10,87	10,87	10			
	4	3	7,02	7,02	10			
	5	3	7,69	7,69	10			



Figura 12. Gráfica de valores promedio vs valores máximos y mínimos basados en el estándar ASTM D877

Para el estándar ASTM D877, el aceite vegetal obtiene valores promedios de tensión de ruptura dieléctrica más altos en comparación con los aceites aislantes de transformador, debido al nivel de pureza de la muestra de aceite empleada y a la cantidad mínima de sedimentos encontrados en comparación con las otras tres muestras de aceite. Así mismo, se evidencia que el valor mínimo de ruptura dieléctrica se encuentra en la muestra de aceite usado número 2, debido a la gran cantidad de sedimentos, humedad y partículas extrañas que se encontraban en su interior.

4. CONCLUSIONES

El estándar ASTM D1816 presenta mayor precisión en la estimación de la tensión de ruptura dieléctrica que el ASTM D877 como lo muestra el análisis de los diagramas de cajas y bigotes. Se evidencia mayor dispersión de los datos empleando el estándar ASTM D877 debido a la separación y diseño constructivo de los electrodos, así como del volumen de aceite en el recipiente.

La presencia de contaminantes en un líquido aislante disminuye la tensión de ruptura, esto se evidencia en los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al aceite vegetal y a las muestras de aceite de transformador usado.

Para la realización de pruebas de tensión de ruptura todo aceite nuevo debe ser sometido a los procesos de termo-vacío, manipulación, obtención, almacenamiento y transporte de la muestra, es decir, debe contar con parámetros de limpieza, hermetismo, condiciones de temperatura adecuadas, manipulación con guantes limpios y un lugar de ambiente controlado, para evitar la contaminación de la muestra y por ende la alteración de los resultados.

En general los valores de tensión disruptiva medidos usando los electrodos planos son mayores a los registrados con los electrodos tipo hongo. Lo anterior se explica porque los electrodos tipo plano están más separados y, por tanto, hay mayor volumen de aceite entre ellos (mayor aislamiento), luego se necesita una diferencia de potencial mayor entre los electrodos de prueba (tensión disruptiva) para exceder el campo eléctrico crítico del medio y de esta manera alcanzar la disrupción eléctrica o falla.

REFERENCIAS

- [1] IEEE. (2017). IEEE Guide for the Evaluation and Reconditioning of Liquid Immersed Power Transformers. Std C57.140.
- [2] IEEE (2015). IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. Std C57.106™-2015
- [3] Abdelmalik A. et al. (2011). Electrical breakdown strength characteristics of palm kernel oil ester-based dielectric fluids. En Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [4] Abdelmalik A. et al. (2012). Electrical conduction and dielectric breakdown characteristics of alkyl ester dielectric fluids obtained from palm kernel oil. IEEE Trans Dielectr Electr Insul 19, 1623-1632.
- [5] Mahanta D. y Laskar S. (2018) Investigation of transformer oil breakdown using optical fiber as sensor. IEEE Trans Dielectr Electr Insul 25, 316-320.
- [6] IEEE. (2013). Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors.

- [7] ASTM. (20017). D3487: Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus.
- [8] Calcara L. et al. (2018). Standard Evolution for the Determination of the Power Frequency Breakdown Voltages in Insulating Liquids. En IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [9] Cerón A. et al. (2015). Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69kV y 230kV usando Lógica Difusa. Inf tecnológica 26, 107-116.
- [10] Veliz E- et al. (2015). Manual de prácticas para el laboratorio de alta tension 2. Universidad Politécnica Salesiana.
- [11] ASTM. (2019). D877: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes.
- [12] ASTM. (2019). D1816: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes.
- [13] Ruiz J. (2016). Herramienta de apoyo en la gestión de mantenimiento de transformadores de potencia de las subestaciones de la electrificadora de Santander S.A E.S.P basado en el análisis del aceite dieléctrico. Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- [14] Hight Volt. (2022). HV Module Test System. Recuperado: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/4-0-en.pdf>

Análisis de un sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersión

Edwing Fabian Amaya Arias¹
Unidades Tecnológicas de Santander
Colombia

Se describe el diseño de un sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersión en un *shut* de basuras en las Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, a través de un estudio comparativo entre dos métodos de cálculo: Amperio hora/system advisor model SAM. Para el dimensionamiento de la superficie de captación se plantea una metodología basada en etapas, las cuales tienen implícitas una serie de actividades. Inicialmente se realizó la caracterización del emplazamiento del sitio a través de las bases de datos NSRDB VIEWER NREL/THE POWER.LARC.NASA; una vez definida se identificaron los requisitos del sistema fotovoltaico de autoconsumo, bajo los cálculos matemáticos de los diferentes elementos que contiene el sistema de aspersión para *shut* de basuras, con el fin de dimensionar la superficie de captación. Posteriormente, se llevó a cabo un estudio comparativo entre los resultados obtenidos, determinando el más adecuado para iniciar el diseño estructural en la institución, establecer los componentes de emplazamiento y físicos, y evaluar los costos para su implementación.

¹ Ingeniero Electromecánico y Magíster en Energías renovables y Eficiencia energética.
Contacto: efamaya@correo.uts.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia el aprovechamiento de los residuos sólidos es muy bajo y a pesar que, en cifras de la Superintendencia de Servicios Públicos y Domiciliarios Superservicios, se estima que entre el 60% y 70% de los residuos sólidos en Colombia se pueden aprovechar por medio del compostaje, no se aprovechan idealmente esta clase de desechos, es por esto, que el presente trabajo ayudara a entender el problema de cómo solucionar los malos olores en los depósitos de basuras o *shut* y de esta manera concientizar a los usuarios de los mismos a la selección y disposición adecuada de los diferentes residuos [1].

La disposición de las basuras actualmente es un tema cultural, donde la población Colombiana se encuentra en proceso de concientización en el tema de la recolección y reciclaje de este tipo de desechos, ya que no existen una política gubernamental en el país, frente a medidas de recolección y aprovechamiento del compostaje o materia prima, a través de tecnologías alternativas como biodigestores generadores de gas que podrían ayudar con la recuperación del planeta, a diferencia de otros países, como España, donde la cogeneración a partir de biogás para autoconsumo es una opción altamente rentable a la vez que sostenible para la industria alimentaria, y así de esta manera se puedan evitar los gases efecto invernadero y la eliminación del consumo de combustibles fósiles que deterioran la capa de ozono [2].

El clima varía en las escalas del tiempo y del espacio; grandes áreas de la Tierra sufren fuertes variaciones como parte normal del clima, especialmente en las zonas áridas y semiáridas, donde la precipitación experimenta cambios significativos. Los extremos climáticos pueden afectar a cualquier región: por ejemplo, severas sequías pueden ocurrir en zonas húmedas e inundaciones ocasionales en secas [3].

En los conjuntos residenciales e industrias, los *shuts* de basura generan gases y toxicidad por los diferentes residuos depositados, estos son la causa de las afecciones de salud de las personas que a diario interactúan con ellos, y aumentan olores desagradables con los cuales debe lidiar la comunidad, que a diario están en contacto con estos sitios de disposición de basuras.

Existen en el mercado productos que minimizan estos olores y además ayudan con la mitigación de los gases tóxicos generados en los sitios de disposición de las basuras, y aunque se hacen sistemas mecánicos de riego, sería ideal presentar un sistema sostenible para realizar la aspersion en los *shuts* de basura que ayude con el riego de dichos productos, por medio de un sistema automatizado.

2. MÉTODO

La modalidad de este proyecto de investigación es descriptiva, se buscará información para determinar los procesos necesarios para el desarrollo de los métodos de cálculo para el dimensionamiento del sistema de aprovechamiento fotovoltaico. La propuesta se desarrollará en las siguientes etapas:

2.1 Etapa 1. Caracterización o emplazamiento del sitio

- Identificación geográfica, para analizar la radiación del sitio y sus condiciones meteorológicas
- Determinar los diferentes métodos de cálculo (NSRDB VIEWER NREL/ THE POWER.LARC. NASA), a implementar en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersion en un *shut* de basuras.
- Aplicar cada método de cálculos (NSRDB VIEWER NREL/ THE POWER.LARC. NASA), para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersion en un *shut* de basuras.
- Comparación de los datos arrojados por las dos bases de datos.

2.2 Etapa 2. Modelado del sistema fotovoltaico de autoconsumo

- Modelado del sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersion en un *shut* de basuras, usando el programa System Advisor Model SAM.

- Selección del sitio donde se implementará el sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersión en un *shut* de basuras, dentro de la institución educativa Unidades Tecnológicas de Santander.
- Identificación de las cargas energéticas, obtenidas bajo el cálculo matemático de los diferentes componentes electromecánicos y de control.

2.3 Etapa 3. Análisis

- Recopilar los datos obtenidos en cada método empleado en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersión en un *shut* de basuras.
- Analizar los sistemas de captación dimensionados para determinar cuál método presenta una proyección exacta y real de la instalación necesaria para el sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersión en un *shut* de basuras.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Ubicación geográfica

Todo proyecto orientado hacia el uso de energías renovables no convencionales tendrá como importancia la ubicación geográfica como punto de partida en el emplazamiento del terreno en donde se presentarán los resultados requeridos y esperados para dicho proyecto, es por ello que utilizando la aplicación SunEarthTools tal como se muestra en la Figura 1, obtenemos la posición geográfica de las Unidades Tecnológicas de Santander y el gráfico de la trayectoria del sol a partir de las coordenadas del lugar.



Figura 1. Posición geográfica o emplazamiento [4]

Una vez definido el sitio de instalación de los paneles foto voltaicos agregados al sistema de aspersión dado en días, meses y horas de trabajo se podrá generar en la aplicación la ubicación geográfica del proyecto con las siguientes coordenadas: Latitud: $7,1048^\circ$ y Longitud: $-73,1235^\circ$.

Las Unidades Tecnológicas de Santander están ubicada en la ciudad de Bucaramanga, Santander, Colombia, del barrio real de minas, tiene una latitud de 7.1048° y una longitud $-73,1235^\circ$, tal como se muestra la Figura 1, en ella podemos evidenciar que el edificio de la institución no tiene sombras alrededor y de esta manera se facilita la instalación de la solución fotovoltaica para el proyecto deseado y mostrando los datos arrojados en la trayectoria solar (Tabla 1).

Tabla 1. Datos Trayectoria Solar

Fecha:	30/09/2021	
coordenadas:	7.1048378, -73.123525	
ubicación:	Unidades Tecnológicas de Santander, Calle 56, Bucaramanga, Metropolitana, Santander, Región Andina, 680005, Colombia	
Hora	Elevación	Azimut
6:40:33	-0,833	92,9
7:00:00	3,98	93,51

8:00:00	18,82	95,63
9:00:00	33,59	98,42
10:00:00	48,23	102,68
11:00:00	62,51	110,83
12:00:00	75,33	133,54
13:00:00	78,91	203,52
14:00:00	68,1	242,87
15:00:00	54,16	254,57
16:00:00	39,63	259,94
17:00:00	24,89	263,18
18:00:00	10,08	265,49
18:44:03	-0,833	266,91

3.2 Bases de datos

Después de analizar el emplazamiento del sitio se determinan las diferentes bases de datos (NSRDB VIEWER NREL/ THE POWER.LARC. NASA), a implementar en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersión en un shut de basuras. La primera es la base de datos NSRDB VIEWER NREL [5], base de datos, donde se analizarán el diseño del sistema fotovoltaico de autoconsumo (Figura 4), conociendo diferentes características encontradas en la base de datos como, potencia requerida, panel solar, inversor y estadísticas anuales, entre otros.

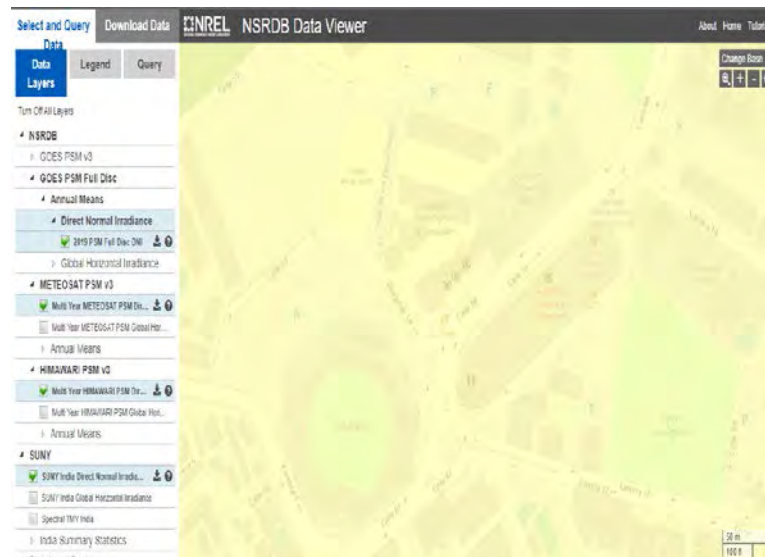


Figura 4. Base de datos NREL [5]

La segunda base de datos escogida (Figura 5) es THE POWER.LARC. NASA [6], base de datos, en donde también podemos revisar según el emplazamiento diferentes características como flujos solares, temperaturas, presión y velocidad del viento y humedad de nuestro diseño de un sistema fotovoltaico de autoconsumo aplicado a un desarrollo tecnológico de aspersión en un *shut* de basuras en las Unidades Tecnológicas de Santander.

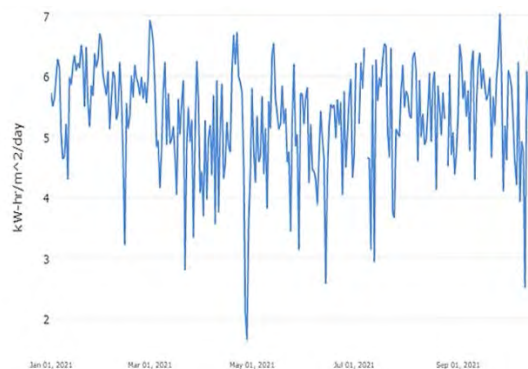


Figura 5. Base de datos de la nasa (irradiancia) [6]

3.3 Parámetros y variables para el sistema de bombeo

Teniendo como punto de partida los planos 2D del cuarto de disposición de basuras identificaremos los posibles componentes para el modelo matemático del dimensionamiento, para ello es importante seleccionar diferentes alternativas tanto de los paneles solares como del sistema de bombeo, es por esto que elaboraremos cálculos para la selección de los mismos.

3.3.1 Ecuación cálculo de la potencia de la bomba

Se utiliza la ecuación general para el cálculo de la potencia de una bomba en KW, luego de obtener los valores de caudal y presión de trabajo.

$$\Delta PT = 15,96 \text{ metros}$$

$$Cp = 7,2 \text{ Gpm}$$

$$\text{Potencia (KW)} = (\text{presion (bar)} * \text{caudal (lts/min)})/600$$

$$\text{Pasamos los Gpm a Lpm}$$

$$7,2 * 3,75 = 27 \text{ lpm}$$

Igualmente, la presión de psi a bar, conociendo que un bar equivale a 0.0689476 psi entonces:

$$22,66 * 0,0689476 = 1,562 \text{ bar}$$

Para hallar la potencia de la bomba reemplazamos en la ecuación junto al factor multiplicador

$$\text{Potencia (KW)} = (1,562 \text{ bar} * 27 \text{ (lpm)})/600 * 5 = \text{kw}$$

$$\text{Potencia} = 0,3514 \text{ (KW)}$$

$$\text{Potencia} = 0,3514 \text{ KW} * \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ KW}}$$

$$\text{Potencia} = 351,4 \text{ W}$$

3.3.2 Selección de la bomba (ficha técnica)

Con los cálculos anteriores obtenemos los parámetros necesarios para la selección de la bomba como se muestra en la Figura 6, presión, el caudal y potencia promedio de 353 Wattios, luego de revisar varias opciones en el mercado y acorde a las al trabajo requerido, se selecciona la electrobomba con las siguientes características (Tabla 2).



Figura 6. Bomba solar [7]

Tabla 2. Características técnicas Bomba-Motor

	Potencia	370 W
	Voltaje	24VDC
Motor	Cuerpo Motor	Fundición
	Rotor	Bronce

Bomba	Max. Flujo	2.1 m ³ /h
	Max Cabeza	30m
	Diámetro Descarga	1"
	Peso total	5Kg

3.4 Dimensionamiento fotovoltaico

3.4.1 Aplicación System Advisor Model SAM

El primer paso para utilizar esta base de datos es ingresar en librería de la misma como se muestra en la Figura 7, los datos de la ciudad a trabajar que en este caso será Bucaramanga, Colombia.

Name	Latitude	Longitude	Time zone	Elevation	Station ID	Source
fargo_nf_463_96.8_mts1_60_tmy	46.9	-96.8	-6	274	14074	TMY2
imperial_ca_32.835205_-115.572398_psmv2_60_tmy	32.85	-115.58	-8	-20	72011	NSRDB
phoenix_az_33.450405_-111.980889_psmv2_60_tmy	33.45	-111.98	-7	458	78208	NSRDB
tucson_az_32.116201_-110.950042_psmv2_60_tmy	32.12	-110.94	-7	773	6745	NSRDB
Bucaramanga_CO-hour (1)	7.13333	-73.1967	-5	945	0	

Figura 7. Librería SAM

Seguido hacemos la escogencia tanto del panel fotovoltaico o modulo e inversor como apreciamos en la Figura 8, siendo el Jinko solar co._Ltd JKM225M-60B y Jinko solar co._Ltd: JKMS310M-60BL-EP[208V] los elementos que cumplen con las características ideales del desarrollo tecnológico.

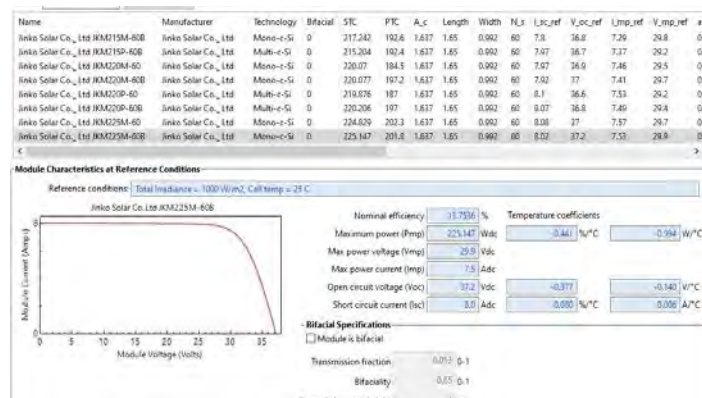


Figura 8. Características SAM [8]

3.4.2 Método amperio hora

Con relación a la materia Energía Solar Fotovoltaica. Autoconsumo, utilizaremos el método amperio hora (Figura 9), para hallar con relación a la potencia de la electrobomba y otros parámetros analizados en las bases de datos.

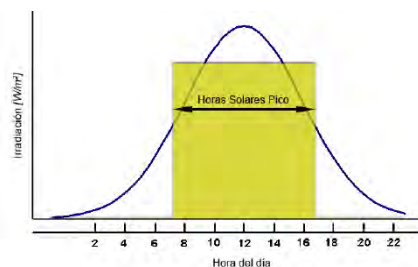


Figura 9. Horas solares pico [9]

Es decir, una hora solar pico HSP equivale a 1kWh/m² o, lo que es lo mismo, 3,6 MJ/m²., es un modo de contabilizar la energía recibida del sol agrupándola en paquetes, siendo que cada *paquete* de 1 hora recibe 1000 watts/m². Según lo anterior Los módulos fotovoltaicos deben orientarse de tal manera que tengan una inclinación no mayor de 15° con respecto a la superficie horizontal y orientados hacia el sur. Para realizar este cálculo se tiene que elegir y conocer la potencia de los módulos a instalar. Este dato viene dado

en las características técnicas de los módulos elegidos según cada modelo y fabricante. Para instalaciones de uso diario utilizaremos la ecuación (1).

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = \frac{\text{Energía necesaria (kwh)}}{(\text{HSP} * \text{Rendimiento de trabajo} * P_{\text{max modulo}})} \quad (1)$$

El rendimiento de trabajo tiene en cuenta pérdidas debido a, la temperatura, el cableado, las perdidas por dispersión de parámetros y suciedad, la eficiencia energética de otros elementos en operación como la eficiencia energética de elementos. Valores típicos de rendimiento en sistemas es de 0,7 y 0,8. Dando continuidad al dimensionamiento fue necesario realizar la selección de los módulos fotovoltaicos que mejor se adaptan a las condiciones requeridas de acuerdo con la potencia nominal o máxima a partir de la cual puede calcularse el número de módulos o paneles necesarios para cubrir el consumo energético reemplazando los valores obtenidos (ecuación (2)).

$$N^{\circ} \text{ total de paneles} = \frac{185(\text{kwh})}{(4,8 * 0,8 * 20\text{w})} = 2,4 \approx 2 \text{ modulos} \quad (2)$$

Del cálculo anterior comprendemos que el número de paneles necesario es de un panel, en el paso 1 se obtuvo una estimación del consumo Promedio diario de 185 W Después de evaluar varias opciones del mercado, se seleccionó el panel fotovoltaico con las características de la Figura 10.



Figura 10. Panel Fotovoltaico Policristalino de 20W-12V [10]

3.5 Diagramas unifilares del sistema final

Con el diagrama general como se muestra en la Figura 11, se evidencian las conexiones eléctricas superficiales de todo el sistema , que entrega su energía solar por medio de los paneles solares cada uno de 20W a 12 V, que conectados en serie y genera un voltaje de 24V para poder cargar las baterías a 24V que también se encuentran conectadas en serie , todo esto para encontrar un arreglo solar de 24V que necesita la bomba para funcionar y así mismo alimentar el tablero de control con su respectivo controlador y de esta manera permitiendo el paso de energía a la Bomba seleccionada.



Figura 10. Diagrama P&ID General

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las pruebas del sistema de aspersión sostenible demuestran que el dimensionamiento realizado con los cálculos está bien estimado o dentro de los rangos de adecuados de funcionamiento, debido a que los paneles generan lo suficiente para el funcionamiento de la bomba pudiendo incluso funcionar por mucho más tiempo de lo necesario.

El cálculo de los Amperios horas estimadas en las baterías nos permiten trabajar el sistema en los días con poco sol o tiempos de invierno, siendo esto uno de los puntos importantes en este proyecto que consistía en la autonomía del sistema y fiabilidad.

En el transcurso del trabajo revisamos la viabilidad económica donde este proyecto al ser residencial no se evidencia una rentabilidad con respecto al estudio del VAN y TIR debido al bajo consumo energético del sistema de aspersión, caso distinto sería donde se instalase en una industria más grande donde las variables aumentan el consumo energético.

Con las nuevas tecnologías se pueden disminuir costos, como lo es el caso de la bomba que tiene su inversor y es ideal para instalaciones fotovoltaicas lo que le da un plus a la instalación eléctrica del sistema.

Existen herramientas o aplicaciones que son muy completas para la selección del sistema más adecuado como lo es el caso de SAM que bajo un dominio de sus características se pueden realizar proyectos ágilmente en el contexto de la energía solar fotovoltaica, indicando características de los paneles inversores y demás soluciones energéticas evidenciadas en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] La República. (2018). Hasta 70% de los residuos sólidos del país se pueden transformar en compostaje. Diario La República. Recuperado: <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/hasta-70-de-los-residuos-solidos-del-pais-se-pueden-transformar-en-compostaje-2762298>
- [2] Newman D. (2019). El biogás en España. Interempresas.
- [3] Ballesteros H. y Aristizábal G. (2019). Gases de efecto invernadero y el cambio climático. Apres.
- [4] sunearthtools.com (2022). Herramientas para los consumidores y los diseñadores de la energía solar. Recuperado: <https://www.sunearthtools.com/>
- [5] SolarAnywhere. (2018). The trusted leader in solar data & intelligence. SolarAnywhere.
- [6] NASA. (2021). Prediction of worldwide energy resources. Recuperado: <https://power.larc.nasa.gov/>
- [7] Gómez I. (2018). Bombas de agua con energía solar. Recuperado: <http://www.igihm.com/bombeo-solar>
- [8] SAM. (2020). Modelo system advisor - SAM. Recuperado: <https://sam.nrel.gov/>
- [9] Durán L. y Salvator e M. (2020). Trabajo de grado. UBGD.
- [10] energiaymovilidad.com (2021). IPS-20esp. Recuperado: <https://www.energiaymovilidad.com/blog/wpcontent/uploads/2018/05/IPS-20esp.pdf>

Desarrollo y evaluación de un sistema electrónico de adquisición de variables fisiológicas para el monitoreo de usuarios de un simulador con realidad virtual

Juan Pablo Vasco Marín¹
Santiago Caro Zapata²
Jonathan Gallego Londoño³
Universidad de Antioquia
Colombia

El uso de juegos serios y realidad virtual como herramienta alternativa para procesos de rehabilitación ha incrementado gracias a sus beneficios. Asimismo, para cuantificar los beneficios o alteraciones adversas sobre la salud del usuario ha surgido la necesidad de monitorear variables fisiológicas del cuerpo humano durante el uso de estas tecnologías. En este estudio se desarrolló y evaluó un sistema para la adquisición de variables fisiológicas, que pudiera ser acoplado a un sistema de simulación basado en un triciclo que controla un juego serio de realidad virtual. El sistema incluye la medición de la frecuencia cardiaca, la frecuencia respiratoria y la distribución del peso corporal para monitorear pacientes durante el uso del simulador. La tecnología implementada incluye elementos como PSoC 5LP, ESP32, Raspberry Pi, Sensor de Pulso, Sensor de esfuerzo torácico alternativo y Sensor de distribución de presión, así como una interfaz de visualización y almacenamiento de datos basada en Node-RED. Se realizaron pruebas de calibración y pruebas de desempeño en cinco voluntarios con edades entre 21 y 54 años, con ambos miembros inferiores sanos y bajo estándares éticos descritos en la Declaración de Helsinki. El sistema se desarrolló e integró al procedimiento de control del simulador. Las pruebas de calibración fueron exitosas respecto al comportamiento esperado. Durante las pruebas de desempeño el sistema logró identificar cambios relacionados con el aumento de actividad física durante el uso del triciclo, sin embargo, para medir la frecuencia respiratoria podría mejorarse al disminuir su dependencia de la ubicación sobre el tórax y automatizar el cálculo de umbrales en tiempo real, así como el medidor de distribución de presión puede mejorar su desempeño al aumentar la frecuencia de muestreo.

¹ Bioingeniero.

Contacto: juanp.vasco@udea.edu.co

² Bioingeniero.

Contacto: santiago.caroz@udea.edu.co

³ Bioingeniero, Magíster en Bioingeniería y Magíster en Ingeniería Biomédica.

Contacto: jonathan.gallego@udea.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los juegos de video, además de continuar su crecimiento en la industria del entretenimiento gracias a diversos avances en tecnología y en el campo de la investigación, también han comenzado a impactar en áreas como la pedagogía y la rehabilitación física y cognitiva, convirtiéndose así en herramientas que van más allá del entretenimiento [1, 2]. A este tipo de videojuegos se les conoce como juegos serios, presentados en la forma tradicional donde se visualiza la imagen en una pantalla o, de forma más inmersiva, utilizando realidad virtual. Estos juegos se caracterizan porque son eficaces al enseñar habilidades muy específicas en el espectro cognitivo o motor, sin perder su esencia de divertir, logrando que una tarea deje de ser aburrida y molesta, para convertirse en una tarea motivante que conlleve a obtener resultados útiles para el desempeño en actividades de la vida real [1-3].

La rehabilitación física es una de esas actividades donde, por su naturaleza, se deben ejecutar ejercicios repetitivos que, por lo general, la convierten en un proceso tedioso y aburrido para los pacientes, siendo este uno de los principales problemas para mantener una constancia durante las sesiones de terapia [4]. Es por esto que en diferentes lugares del mundo se han estado implementando los juegos serios en los procesos de rehabilitación, ya que han logrado añadir un importante factor motivacional que permite mejorar la constancia y, a su vez, han tenido una gran acogida tanto por parte del personal asistencial como por los pacientes. Además, el diseño y uso de estos videojuegos ha tenido un gran crecimiento en los últimos años y, en la actualidad, se continúa investigando sobre maneras óptimas de implementar videojuegos para generar estrategias de rehabilitación cada vez más eficaces y motivantes [1, 2, 4].

Diferentes tipos de videojuegos serios para rehabilitación necesitan el uso concomitante de herramientas físicas con funciones de control externo, también llamadas simuladores, para ayudar a imitar las sensaciones que un usuario podría experimentar si estuviera realmente dentro del entorno simulado. Dichas herramientas físicas se han aprovechado para mejorar aún más las posibilidades de rehabilitación y obtener una sensación háptica [5]. Algunas estrategias que combinan videojuegos y herramientas externas para rehabilitación se pueden encontrar en [6], donde se diseñó un sistema de entrenamiento físico y mejora del control motor de personas que sufrieron un accidente cerebrovascular, la cual consistía en una bicicleta en conexión con un juego de realidad aumentada.

En el juego serio utilizado, el paciente debía controlar la velocidad del avatar de un ciclista con su ritmo cardíaco y el objetivo era alcanzar y mantener el ritmo necesario para igualar el desempeño de un segundo avatar programado por el terapeuta. Así que, configurando el ritmo del segundo avatar, se controlaba la intensidad del ejercicio.

Además, en una revisión realizada en [1] se observan ocho estudios que han utilizado juegos con el propósito de rehabilitar pacientes, donde las herramientas para el control del video juego van desde el simple uso de teclado y joysticks, hasta el uso de captura de movimiento, manta de presión y la tabla de equilibrio del Nintendo Wii ®. Estos dos últimos propuestos respectivamente por [7, 8] fueron usados para mejorar el balance, el primero en pacientes con daño en la espina dorsal y el segundo para personas de edad mayor. Del mismo modo, otros autores usaron sus estudios para el tratamiento de pacientes que sufrieron accidentes cerebrovasculares, uno de ellos mejorando las habilidades motoras y, el otro, las cognitivas [9, 10].

Dentro de las diferentes estrategias de rehabilitación que implementan la realidad virtual, o en su defecto, la realidad aumentada, se ha evidenciado la necesidad de realizar el seguimiento de variables fisiológicas del cuerpo humano, tanto antes, como durante o después de las sesiones de rehabilitación a los pacientes, de manera que se pueda estimar cuantitativamente los diferentes beneficios o alteraciones que genera el sistema que se está implementando sobre el estado de salud de la persona.

En primer lugar, la medición de variables como la frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria han permitido verificar el nivel de beneficio que poseen algunos juegos basados en realidad virtual sobre la problemática del sedentarismo, en comparación con los videojuegos tradicionales que no requieren actividad física para su ejecución [11]. En la medición de dichas variables se ha logrado estimar que algunos

juegos de realidad virtual pueden incrementar la frecuencia cardíaca y, a su vez, no generar cambios significativos en la frecuencia respiratoria, de forma que es posible clasificar qué tipo de implementaciones de los juegos de realidad virtual son útiles para determinados tipos de procesos de rehabilitación, en función de los objetivos del mismo [11, 12].

Por otra parte, la medición en conjunto de variables fisiológicas como la actividad electrodermal, la temperatura corporal, la frecuencia cardíaca y el pulso de volumen de sangre han permitido, con base en la literatura, la estimación cuantitativa del denominado *Cybersickness*, que no es más que una sensación de mareo durante la exposición a entornos de realidad virtual, el cual es uno de los principales efectos negativos generados por el uso de dicha estrategia, de forma que se puedan identificar y efectuar ajustes necesarios sobre el sistema o evaluar la proporción de beneficio y daño causado por el juego [13]. De manera adicional, la medición periódica de la presión sanguínea en conjunto con la frecuencia cardíaca ha sido útil para evaluar si algunos sistemas de realidad virtual basados en bicicletas permiten la mejora del estado físico de las personas en rehabilitación, considerando que el ejercicio en determinadas zonas de frecuencia cardíaca incrementa la capacidad aeróbica [6].

Teniendo en cuenta lo anterior, el grupo de investigación en bioinstrumentación e ingeniería clínica – GIBIC, de la Universidad de Antioquia, ha estado desarrollado un sistema (Figura 1) que implementa un triciclo reclinado fijado a un rodillo de entrenamiento que permite su uso sin desplazamiento y en conexión con un juego serio en realidad virtual, como una estrategia para la rehabilitación de personas con amputación de miembro inferior para mejorar la adherencia de ellas a sus prótesis. Para lograr esto, en dicho proyecto, se diseñó un sistema de medición de variables cinemáticas, tales como la velocidad, la cadencia, el giro del manubrio y la cantidad de frenado, el cual envía de forma constante dichas mediciones al juego, para que haya una correspondencia de lo que sucede en éste con lo que realmente sucede en el triciclo, para de esta forma disminuir la posibilidad de mareo [14].



Figura 1. Sistema diseñado por el grupo GIBIC para rehabilitación de personas con amputación de miembro inferior: a) Vista completa del simulador, b) Paciente usando el sistema con las gafas de realidad virtual

Sin embargo, existe la necesidad de realizar la medición y almacenamiento de variables fisiológicas durante la utilización del sistema desarrollado, para poder evaluar a futuro el desempeño y los beneficios del sistema en la mejora de la adherencia de sujetos amputados a su prótesis, o de pacientes que necesiten rehabilitación del miembro inferior, y su aporte a disminuir el problema del sedentarismo, mejorar la capacidad aeróbica y, si es posible, la estimación del *Cybersickness* generado por el sistema.

Dentro de la búsqueda de herramientas para realizar las mediciones y almacenamiento de las variables fisiológicas mencionadas anteriormente, se encuentra en primer lugar los monitores de signos vitales, los cuales permiten medir, entre otros, la frecuencia cardíaca de una persona a través del análisis de las señales electrocardiográficas, usando electrodos ubicados en el cuerpo del paciente que detectan los impulsos eléctricos asociados a las contracciones rítmicas del corazón.

Por otro lado, algunos de estos monitores de signos vitales permiten realizar también la medición de la frecuencia respiratoria, mediante la medición de los cambios temporales de bioimpedancia en electrodos ubicados en el pecho debido a la fluctuación del volumen pulmonar con la inspiración y espiración [15, 16]. Sin embargo, la gran mayoría de estos dispositivos médicos no permiten exportar la señal capturada para

ser almacenada o transmitida en tiempo real a otro sistema y, por lo tanto, dicho dispositivo médico representaría un gran obstáculo para la integración al triciclo debido a su alta complejidad y funcionamiento en sistema de caja negra característico de los dispositivos comerciales.

En segundo lugar, los pulsioxímetros comerciales son dispositivos que mediante métodos ópticos permiten monitorear el pulso cardíaco y la saturación parcial de oxígeno en sangre, y podrían ser útiles para la medición de la frecuencia cardíaca de manera sencilla y no invasiva; sin embargo, no capturan señales asociadas a la mecánica ventilatoria que permitan extraer información para determinar la frecuencia respiratoria de una persona. Además, al igual que los monitores de signos vitales convencionales, no permitirían una integración adecuada con el sistema diseñado debido a que no se puede obtener la señal cruda para ser almacenada y procesada [17].

Como tercera alternativa, la medición de la frecuencia respiratoria puede realizarse mediante la implementación de un Monitor Metabólico comercial, el cual estima el gasto calórico mediante calorimetría indirecta e implementando sensores de flujo gaseoso conectados a mascarillas faciales para medir volúmenes de oxígeno y dióxido de carbono, de forma que, al medir dichas señales de flujo es posible estimar la frecuencia respiratoria [18]. Sin embargo, desde la crisis sanitaria causada por el virus SARS-CoV-2, la medición de la frecuencia respiratoria mediante este método es riesgosa en estudios seriados sobre pacientes, al necesitar del contacto directo con los gases en circulación por el sistema respiratorio, generando un factor de riesgo de contagio que no se puede tolerar.

Adicionalmente, este método también presenta los inconvenientes mencionados anteriormente para la obtención de la señal cruda en tiempo real que permita la integración con el sistema desarrollado por GIBIC y, además, ha sido desarrollado para un funcionamiento en entorno hospitalario, el cual es muy diferente a las condiciones esperadas de prueba para el sistema desarrollado.

Otra de las mediciones que pueden ser de gran importancia para monitorear durante el uso del triciclo reclinado y el videojuego, por parte de pacientes con prótesis de miembro inferior, adicional a la frecuencia respiratoria y la frecuencia cardíaca, es la distribución de presión de interface entre el peso corporal y la silla del asiento [19]. Esta variable puede utilizarse como una medida de la simetría de la distribución de peso en los pacientes con prótesis de miembro inferior, debido a que ellos con el transcurso del tiempo comienzan a experimentar desgaste, e incluso patologías en el miembro sano a causa de la sobrecarga a la que éste se ve sometido [20]. Además, este tipo de dispositivos también han sido usados para medir la distribución de presión corporal sobre superficies blandas para prevenir la formación de lesiones por presión y úlceras [21].

Estos dispositivos son diseñados usualmente mediante la interconexión de un sistema basado en microcontroladores o microprocesadores con una matriz de sensores de presión flexibles sobre un material blando; dichos sensores pueden ser piezoeléctricos, piezorresistivos o capacitivos [22, 23]. El método de matriz de sensores piezorresistivos fue usado por el grupo GIBIC para diseñar, prototipar y producir una sábana para medir la distribución de presión de una persona sobre una superficie, el cual que puede ser útil para la prevención de escaras [24].

Los monitores comerciales mencionados, además de no permitir la obtención de la señal cruda para un procesamiento y almacenamiento, presentan un común denominador que hace que su implementación no sea posible en el sistema diseñado, y es que carecen de la adecuada integración física con el triciclo horizontal debido a su forma, tamaño y la gran cantidad de cables o accesorios que se deben conectar al paciente, los cuales podrían convertirse en un obstáculo para el desarrollo de las pruebas. Es por esto que se hace necesario diseñar un sistema de medición de variables fisiológicas que sea robusto, adaptable al triciclo, que permita almacenar los datos crudos y que funcione de manera modular.

Por ejemplo, la tecnología utilizada en el diseño de la sábana de medición de distribución de presión de interfaz puede modificarse y ajustarse para diseñar un sensor ajustado al asiento de la silla del triciclo del juego serio y, así, poder medir la distribución de presión de un paciente con prótesis sentado sobre ella, con

el fin de tener una estimación de la asimetría durante el pedaleo. De la misma manera, se propone diseñar sistemas de sensado de frecuencia cardiaca y frecuencia respiratoria ajustados a la necesidad del proyecto.

Según lo anterior, en este capítulo se muestra la metodología implementada para el diseño, calibración, implementación y evaluación de un sistema de medición de variables fisiológicas, específicamente frecuencia cardiaca, frecuencia respiratoria y distribución de presión de interfaz, con la cualidad de ser modulares, utilizando componentes electrónicos inteligentes, y con capacidad de adaptarse fácilmente al triciclo usado en el juego serio de realidad virtual.

Dicho sistema fue ensayado inicialmente en cinco sujetos sanos que utilizaban simultáneamente el triciclo sin estar conectado al juego serio, esto con el fin de verificar la estabilidad, funcionamiento y respuesta de las señales fisiológicas mientras se usa el triciclo. El sistema completo podrá usarse posteriormente en el análisis de rehabilitación de pacientes con prótesis de miembro inferior que usan el juego serio mientras sus signos vitales son monitoreados.

2. MÉTODO

Este trabajo se llevó a cabo en tres etapas, la primera de estas hace referencia al diseño del sistema para medir las tres variables fisiológicas de interés, la segunda se refiere a la calibración de los sistemas y, por último, se realizaron pruebas en cinco sujetos para revisar el correcto funcionamiento de todos los componentes del sistema y su capacidad de acople con el triciclo.

2.1 Diseño del sistema

El sistema diseñado está compuesto por tres subsistemas, correspondientes a cada una de las variables a medir, es decir, frecuencia cardiaca, frecuencia respiratoria y distribución de presión. El sistema debía diseñarse de tal manera que pudiese acoplarse al triciclo usado como simulador de un juego serio para estudios de rehabilitación en pacientes con prótesis de miembro inferior como se mostró en la Figura 1.

2.1.1 Microcontrolador de acondicionamiento

Uno de los requisitos de diseño del sistema de medición de variables fisiológicas era la modularidad, es decir, un sistema capaz de ser fácilmente modificable para el acondicionamiento de las señales de entrada y con la capacidad de añadir o quitar variables de medición. Para cumplir con dicho propósito se utilizó un PSoC 5LP de referencia C8C5888LTI-LP097 que está inmerso dentro de una placa de prototipado rápido CY8CKIT-059 que se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Sistema de prototipado rápido CY8CKIT-059 con el microcontrolador C8C5888LTI-LP097 el cual fue implementado como sistema de acondicionamiento. Sus componentes analógicos y digitales programables brindan la versatilidad necesaria al sistema para ser modular y reconfigurable

Dicho microcontrolador cuenta con una CPU ARM Córtex M3 de 32 bits, memoria FLASH de 256 kB, RAM de 64 kB, Operación desde 0 hasta 80 MHz, dos conversores análogo-digitales de aproximaciones sucesivas ADC-SAR de hasta 12 bits, 68 pines de los cuales 38 sirven como entradas y salidas programables analógicas y digitales, entre otras [25]. Una de sus principales características es que cuenta con periféricos analógicos y digitales programables, los cuales permiten diseñar hardware reconfigurable y adaptable a las necesidades de un sistema. Lo anterior fue determinante en la elección de este microcontrolador para el proyecto. Los componentes analógicos internos del PSoC, tales como amplificadores operacionales programables, permitieron reducir el número de componentes físicos externos que serían necesarios para el acondicionamiento de las señales fisiológicas.

2.1.2 Acondicionamiento señal de pulso cardiaco

El sensor seleccionado fue el Sensor de Pulso, fabricado y comercializado por World Famous Electronics Ilc. (Figura 3), el cual permite capturar la señal de pulso cardíaco bajo principios de fotopletismografía. Este sensor basa su funcionamiento en un LED verde y un foto-receptor que captura la señal dispersada por la sangre y los tejidos circundantes a los vasos sanguíneos.

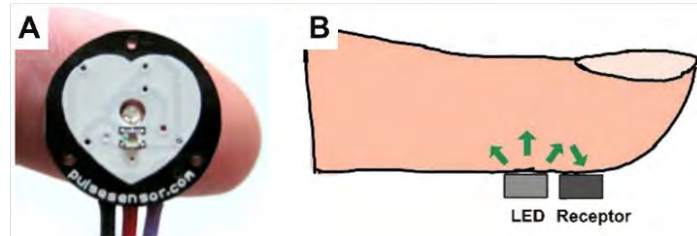


Figura 3. A) Sensor de pulso implementado en el sistema, cuenta con un LED verde, un foto detector y un circuito de preacondicionamiento. B) Principio de funcionamiento de captura de luz verde dispersada por los tejidos circundantes a las arterias de un dedo

Dicho sensor contiene un circuito de pre acondicionamiento, requiriendo únicamente para su funcionamiento una alimentación eléctrica de 5V, conexión a tierra y un cable de salida la señal capturada, la cual debe ser acondicionada apropiadamente para suavizar y amplificar la señal. Adicionalmente, es necesario que el sensor esté en una ubicación del cuerpo que permita medir la dispersión de arterias relativamente superficiales, por lo tanto, suele ubicarse en el lóbulo de la oreja o las puntas de los dedos como las ubicaciones de preferencia.

Con el uso del software PSoC Creator®, se diseñó el sistema de acondicionamiento para la señal de pulso cardíaco sin la necesidad de usar componentes externos adicionales. Dicho acondicionamiento consiste en primera instancia en la aplicación de un filtro pasa altas pasivo de primer orden con frecuencia de corte 0.43Hz, para eliminar frecuencias bajas asociadas a tendencias lineales de baja frecuencia que no tienen información importante. Posteriormente, se resta un nivel de offset correspondiente a la mitad del voltaje de alimentación del PSoC ($V_{dda}/2$) mediante un amplificador de ganancia programable PGA, tal y como se observa en la Figura 4.

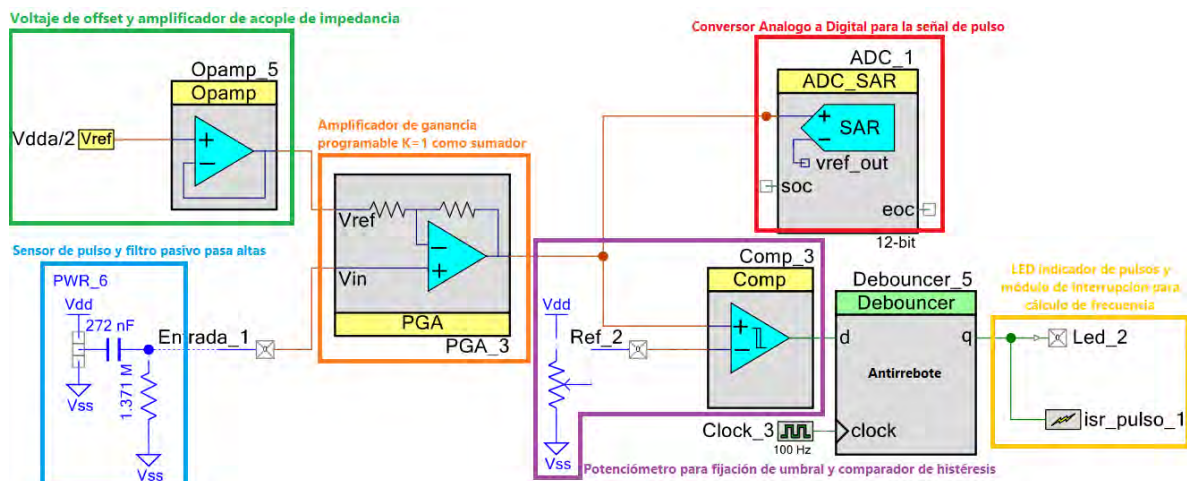


Figura 4. Esquemático circuital del acondicionamiento analógico de la señal de pulso utilizando los componentes del microcontrolador C8C5888LTI-LP097. En los recuadros se menciona la etapa realizada en cada uno de ellos

Dicho PGA permite que se pueda hacer una amplificación programada desde el microcontrolador. El resultado de dicha resta es enviado por vías analógicas a dos puntos diferentes. En primer lugar, es conectada dentro del mismo PSoC al pin positivo de un comparador de voltaje con histéresis que, a su vez, tiene el pin negativo conectado a un voltaje DC denominado umbral, proveniente de un potenciómetro externo. La salida de dicho comparador se usa para generar una señal cuadrada cuyos flancos de subida se utilizan para crear una interrupción de la CPU asociada al pulso cardíaco.

La señal cuadrada es utilizada para encender un LED como indicador del pulso y los periodos de interrupción de la CPU son utilizados para el cálculo de la frecuencia cardiaca mediante el firmware. En segundo lugar, la señal es enviada también a un ADC-SAR de 12 bits dentro del PSoC, para luego ser procesada digitalmente con un filtro complementario digital que suaviza la señal y, además, se obtiene un segundo método de cálculo de frecuencia cardiaca mediante el firmware sin la necesidad de detección del umbral externo.

2.1.3 Acondicionamiento de señal de frecuencia respiratoria

El método implementado para realizar la medición de la frecuencia respiratoria en el sistema consistió en la medición indirecta del cambio de volumen del tórax debido a los procesos de inspiración y espiración. Este método suele ser llamado detección de esfuerzo torácico y permite la obtención de una señal que se correlaciona con los cambios periódicos del volumen torácico durante la expansión y compresión del tórax, permitiendo así realizar la medición de la frecuencia respiratoria [18].

Para el diseño de dicho sistema de medición se utilizó un sensor de flexión piezorresistivo de Spectrasymbol™ en conjunto con el acople de piezas impresas en 3D y una correa de sujeción ajustable para lograr la ubicación de este alrededor del pecho de una persona a la que se le realizará la medición (Figura 5).

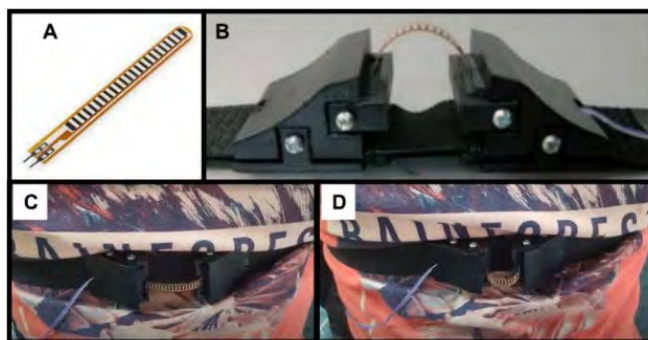


Figura 5. A) Sensor de Flexión de 55mm de largo y resistencia inicial de 25kohm. B) Acople impreso en 3D para fijar el sensor de flexión en conjunto con un elástico. C) y D) Correa de sujeción que permite la detección del cambio de volumen del tórax durante la inspiración y espiración respectivamente

El sensor al ser piezorresistivo genera un cambio de resistencia cuando es deformado y, para este caso en específico, la deformación sucede con los cambios de volumen del tórax. La ventaja de dicho sistema es que permite ser usado en conjunto con el triciclo de simulación de realidad virtual y además realiza una medición sin la necesidad del contacto directo con la piel del paciente ni con fluidos de las vías respiratorias.

Para el acondicionamiento de la señal de salida de dicho sensor se implementó nuevamente los componentes analógicos internos del PSoC, en conjunto con algunas resistencias y capacitores para el filtrado. Inicialmente, desde el PSoC 5LP se aplica un voltaje estable de 1.024 V al sensor, que es representado en el esquemático como un resistor, y se conecta a un amplificador inversor de ganancia programable, inicialmente configurado con ganancia de 3, para obtener un voltaje de salida que variará en función de la deformación generada sobre el sensor por los movimientos respiratorios. Para evitar señales de voltaje negativos, la señal es montada sobre un nivel de referencia de aproximadamente 2,5V correspondiente a la mitad del voltaje de alimentación del PSoC ($V_{dda}/2$).

La señal de voltaje obtenida representa las variaciones volumétricas del tórax, pero es de baja amplitud y susceptible al ruido eléctrico, es por esto que se realizan etapas posteriores de amplificación y filtrado. Se realiza una amplificación de 22 veces el valor de entrada en dos etapas contiguas, obteniéndose una señal de amplitudes pico-pico del orden de unidades de voltios, asegurándose que no supere el máximo ni el mínimo valor de alimentación del PSoC al restarle un voltaje de offset controlado desde un conversor digital analógico DAC, para luego aplicar un filtro pasa bajas pasivo de primer orden con frecuencia de corte de aproximadamente 1 Hz.

Dicha frecuencia de corte permite limitar las frecuencias de interés obtenidas a los rangos de frecuencia respiratoria en adultos que se encuentran entre las 12 y 18 respiraciones por minuto, que equivalen a una frecuencia de 0.2 Hz y 0.3 Hz, respectivamente [26].

Finalmente, al igual que para la señal de pulso cardíaco, la señal es enviada a una etapa de comparación analógica y a un ADC-SAR de 12 bits, ambas realizadas con el fin de obtener la frecuencia respiratoria en tiempo real. La Figura 6 muestra el esquemático diseñado e implementado dentro del software PSoC Creator para llevar a cabo todo el acondicionamiento descrito.

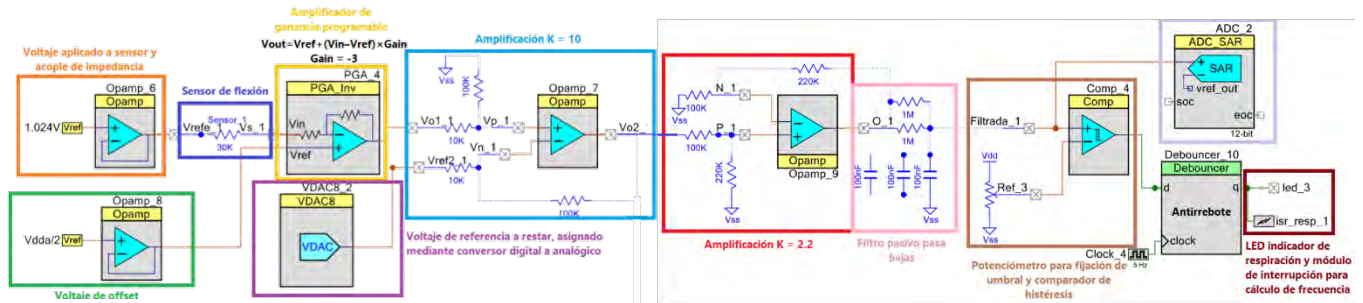


Figura 6. Esquemático circuital del acondicionamiento analógico de la señal de esfuerzo torácico usado para medir la frecuencia respiratoria. Se usan los componentes analógicos internos del PSoC. En los recuadros se menciona la etapa realizada en cada uno de ellos

2.1.4 Integración y cálculo de frecuencias en el PSoC 5

El acondicionamiento completo de las señales fue fusionado dentro del PSoC con el fin de tener todo un sistema modular fácilmente reconfigurable sin la necesidad de usar componentes activos externos al microcontrolador. Esta integración de sistemas permitió la obtención simultánea de ambas señales. La Figura 7 muestra el esquemático final del circuito de integración del acondicionamiento el cual necesitó la adición de un multiplexor analógico para la conexión con el ADC-SAR, un módulo para el conteo de tiempo y un módulo UART. Para el cálculo de las frecuencias cardíaca y respiratoria se diseñó un algoritmo que permite medir de manera simultánea ambos valores dentro del mismo dispositivo por dos métodos diferentes.

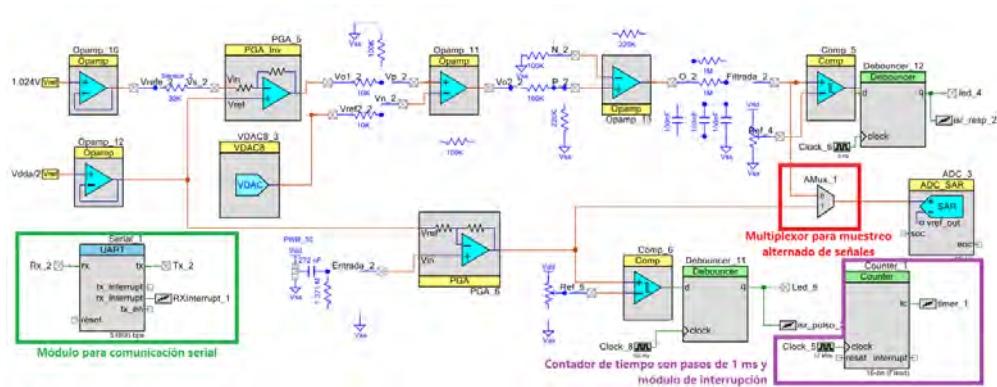


Figura 7. Integración de la etapa de acondicionamiento de los dos sensores usados. Se usaron cuatro amplificadores operacionales, dos PGA, dos comparadores con histéresis, un DAC, dos circuitos antirrebote, un mux analógico, un ADC-SAR de 12 bits, un contador y un módulo UART

En el primer método la señal digital de cada sensor es suavizada utilizando un filtro complementario basado en la ecuación (1), donde (S_i) corresponde al valor suavizado, (x_i) es el valor digitalizado original, (a) es una constante calculada experimentalmente para cada tipo de señal y (S_{i-1}) es el valor previo digitalizado y suavizado.

$$S_i = (a)(x_i) + (1 - a)(S_{i-1}) \quad (1)$$

Posteriormente, la señal suavizada es comparada mediante firmware con un valor umbral calculado mediante un promedio de las señales durante tres segundos. A partir de dicho instante, cada que el valor

de la señal suavizada supere el umbral se considera como un periodo de dicha señal y el tiempo en milisegundos es almacenado en un vector. El promedio del periodo de cada señal es medido utilizando una ventana móvil de 10 registros para la señal de pulso y, tres registros para la señal de respiración debido a las naturalezas de las señales, permitiendo tener mayor precisión y estabilidad en la medición con resolución de milisegundos. Finalmente, las frecuencias cardiaca y respiratoria se calcularán como el inverso de dicho promedio móvil.

En el segundo método se usa solamente la señal cuadrada, proveniente de la comparación de la señal analógica acondicionada con un umbral externo, cuyos flancos de subida periódicos se asocian a una interrupción de la CPU. El tiempo en que sucede cada interrupción es almacenado en un vector y a partir de ahí se realiza el mismo proceso de cálculo de frecuencias del primer método mediante un promedio móvil de diez o tres registros dependiendo de si la señal es proveniente del pulso cardiaco o la respiración, respectivamente.

Los valores de frecuencia calculados y las señales suavizadas digitalizadas se envían a través del puerto UART a una velocidad de 57600 baudios a un centro de control que se encarga de procesar simultáneamente las señales fisiológicas y las señales mecánicas del triciclo para centralizar la información y permitir controlar el juego serio con el movimiento del triciclo mientras el usuario es monitoreado en tiempo real. Para dicho centro de control se usó una Raspberry-Pi 4 de 4 GB de RAM con un procesador de cuatro núcleos y con velocidad de 1.5GHz. La Figura 8 resume los algoritmos para el cálculo de las frecuencias cardiaca y respiratoria.

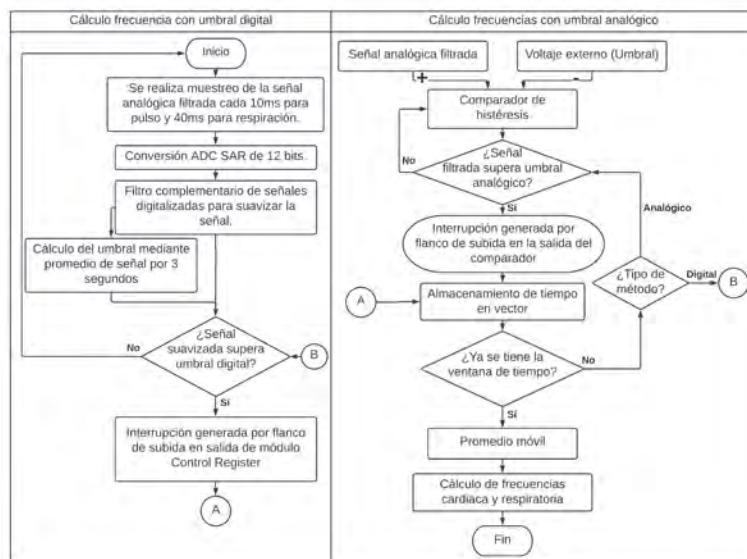


Figura 8. Algoritmos implementados para medir las frecuencias cardiaca y respiratoria desde el PSoC. El sistema puede realizar la medición mediante dos maneras

2.1.5 Distribución de presión

El sistema utilizado para la medición de la distribución de presión está basado en un sistema que fue desarrollado con anterioridad por el grupo de investigación GIBIC de la Universidad de Antioquia, el cual es *dispositivo de medición de presión que incluye un sensor piezorresistivo multicapa para prevenir la formación de escaras* [24]. Dicho diseño fue modificado y ajustado a las necesidades del proyecto para cubrir el área del asiento de la silla del triciclo con una distribución espacial de sensores de presión piezorresistivos en 13 filas por 14 columnas como se muestra en la Figura 9.

El sensor completo utiliza tela piezorresistiva cortada en tiras con una cortadora láser en conjunto con capas de líneas de tela conductiva y una tela de soporte para generar el efecto de múltiples sensores de presión dispuestos de forma matricial. Cuando no existe presión sobre el sensor, los conductores de las filas no entran en contacto con los conductores de las columnas. En el momento en que exista alguna presión, al menos una fila y una columna entrarán en contacto eléctrico comportándose como una resistencia que

variará su conductividad dependiendo de la deformación obtenida por la presión ejercida de manera perpendicular al sistema.

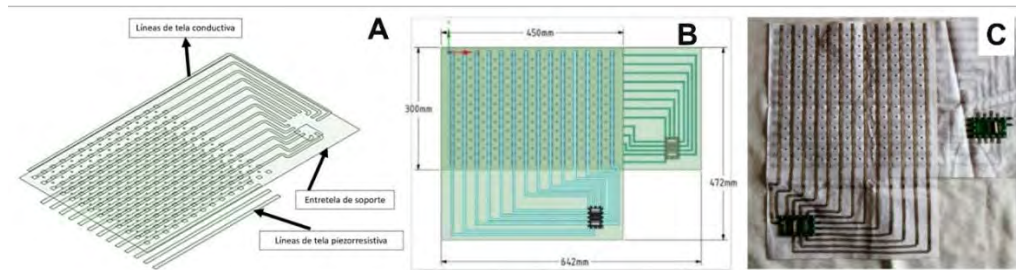


Figura 9. Diseño del sensor de distribución de presión (también llamado cojín): A) Componentes de la capa superior del sensor. B) Diseño en CAD de la distribución de filas y columnas del sensor. C) Sensor fabricado luego de corte láser y plastificado

Las señales provenientes de las filas y las columnas son conectadas a un circuito de acondicionamiento que consiste en un multiplexor, un shift-register, un conversor ADC de 12 bits (ADS-1015) y un microcontrolador (Figura 10).

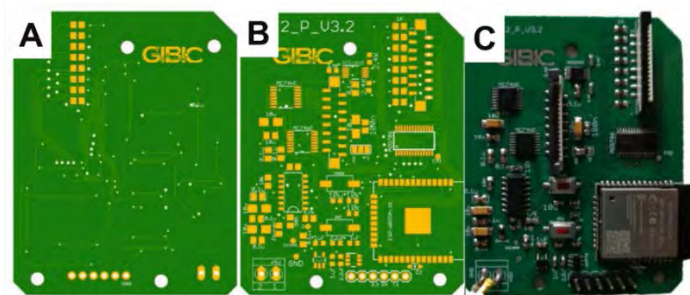


Figura 10. Tarjeta diseñada para el acondicionamiento de las señales provenientes del sensor de distribución de presión: A) Capa inferior diseñada. B) Capa superior diseñada. C) Tarjeta ensamblada con un ESP32, un multiplexor, un shift-register y otros elementos pasivos

Para realizar las mediciones se utilizó un ESP32 que controla el circuito de acondicionamiento, de tal manera que realiza un barrido para leer la medida de presión en cada intersección. Este procedimiento consiste en dar alimentación solamente a una fila con el *shift-register*, asegurándose que las otras filas quedan apagadas, y simultáneamente se selecciona la columna a leer con el multiplexor haciendo que el punto en que se cruzan sea el punto del cual se realiza la lectura de la medición; este procedimiento se repite variando las columnas y las filas hasta finalmente recorrer todo el sensor. En cada una de las conmutaciones se hace la conversión ADC del valor capturado y se almacena la medición de todo el sensor en una matriz en el microcontrolador. Todos estos elementos se integraron en una tarjeta electrónica que a su vez es alimentada por la misma fuente de alimentación del PSoC.

Estas mediciones son enviadas al centro de control, vía UART emulado, a 115200 baudios, mandando uno a uno los datos de la matriz en código ASCII y finalizando con un carácter especial. El envío total de todos los datos de la matriz se hace cada 0.7 segundos que fue la máxima velocidad alcanzada por el sistema. El centro de control recogerá por lo tanto las señales acondicionadas provenientes no solo del PSoC y del triciclo sino también del ESP32.

2.2 Pruebas de calibración

Cada uno de los sistemas diseñados fueron sometidos a pruebas de calibración para determinar los intervalos de medición, la precisión, la exactitud, los posibles errores y la detección de posibles ajustes.

2.2.1 Calibración de frecuencia cardiaca

Para determinar la estabilidad y correcto funcionamiento de la medición de la frecuencia cardiaca, se diseñó una prueba de calibración controlada que consistía en usar una señal de frecuencia conocida obtenida

desde un generador de señales. La premisa del experimento se basa en que luego del comparador de histéresis en la etapa de acondicionamiento dentro del PSoC se obtiene una señal cuadrada que tiene la misma frecuencia de la señal de pulso.

Por lo tanto, para realizar la calibración del sistema, se abrió el circuito y se reemplazó la señal cuadrada del comparador por una señal cuadrada con una amplitud de 5 voltios pico a pico, con un offset de 2,5V y de frecuencia conocida obtenida desde un generador de señales OWON AG1022 25 MHz 125Ms/s de dos canales variando las frecuencias desde 0.833 Hz hasta 2.167 Hz con pasos de 0.034Hz que equivalen a frecuencias cardiacas entre 50 bpm y 130 bpm con pasos de 2 bpm. El resultado esperado era obtener una frecuencia de salida similar a la generada la cual fue medida con un osciloscopio Tektronix TDS2002B 60MHz 1GS/s. De esta manera, se pudo lograr corroborar que el algoritmo diseñado es capaz de medir la frecuencia de una señal cuadrada en el rango de frecuencias cardiacas normales de adultos sanos.

Por otro lado, para corroborar que la señal de pulso suavizada estuviera correcta y que fue obtenida desde el acondicionamiento analógico dentro del PSoC, se realizó la visualización de la misma en cinco sujetos de prueba en reposo y se verificó que durante al menos 30 segundos la forma de onda de la señal se mantuviera constante.

2.2.2 Calibración de frecuencia respiratoria

La calibración de la frecuencia respiratoria se realizó según los pasos hechos en [27]. El procedimiento se hizo con ayuda de un sujeto de prueba y un analizador de flujo de gases para ventiladores mecánico FLUKE VT650, que como su nombre indica, mide el flujo del aire que circula en una máscara usada por un sujeto (Figura 11). Este dispositivo fue considerado como el patrón de medición para la calibración del sensor diseñado y es capaz de entregar un valor de flujo cada segundo. El patrón es capaz de almacenar la señal de flujo obtenida para luego ser extraída y comparada con la señal obtenida por el sensor.



Figura 11. Calibración del sensor de respiración con FLUKE VT650. En rojo sensor de respiración desarrollado y en amarillo el patrón de medición FLUKE VT650. Durante la prueba el sujeto inhala y exhala de forma controlada. El patrón detecta cambios en el flujo, mientras el sensor detecta cambios en el volumen del tórax durante la respiración

Cabe resaltar que lo que se busca comparar es la frecuencia respiratoria obtenida por el dispositivo patrón en comparación con la obtenida por el sensor diseñado, pero la naturaleza de ambas señales es diferente, ya que el primero mide el flujo de aire, y el segundo mide el volumen torácico durante la respiración. Aunque las dos señales provienen de fenómenos fisiológicos diferentes, poseen componentes frecuenciales similares y, por lo tanto, la frecuencia respiratoria medida desde un método u otro pueden compararse.

En el experimento de calibración, el sujeto de prueba debía respirar controladamente en tres niveles de frecuencia respiratoria (bajo, medio y alto) por 20 segundos en cada uno. El experimento se repitió en sentido contrario, es decir, empezando por una frecuencia alta y terminando por una frecuencia baja. La premisa es que ambos dispositivos deberían detectar frecuencias respiratorias similares y comparables sin importar el valor de frecuencia generado por el sujeto.

Al igual que con la señal de frecuencia cardiaca se realizó una inspección visual de la señal en cinco sujetos de prueba en estado de reposo y se verificó que durante 30 segundos la forma de la onda de la señal mantuviera una constancia, para de esta manera verificar que el sensor estuviera adquiriendo una señal coherente con la respiración y a su vez permitiera un cálculo correcto de la frecuencia.

2.2.3 Calibración de sensor de distribución de presión

Para la distribución de presión se realizó una calibración cualitativa que consistió en dos etapas, debido a que el interés del sensor es saber los lugares donde más se está distribuyendo la presión y no el valor de la presión como tal. La primera etapa consistió en verificar que cada uno de los sensores piezorresistivos de la matriz de 13x14 fuera capaz de responder a un estímulo constante de presión y obtener un cambio detectable. Para esto se ubicaron sobre el sensor diferentes formas de masas que, luego de la etapa de acondicionamiento y envío de información al centro de control, fueron visualizadas en una pantalla gracias a un algoritmo desarrollado en Python y OpenCV.

Todos los sensores fueron probados por grupos y no de manera individual. La segunda etapa pretendía verificar que el sensor al ser ubicado sobre el asiento del triciclo fuera capaz de detectar la distribución de presión de una persona sentada sobre él. Para llevarla a cabo se solicitó a un sujeto de prueba que se sentara en el cojín y se ubicara de cuatro formas diferentes: 1) apoyándose sobre el glúteo izquierdo, 2) apoyándose sobre el glúteo derecho 3) sentado normal, y 4) pedaleando a una velocidad cómoda para el participante. La idea de la prueba era observar que los sensores que se activaban estuvieran en la misma zona donde se estaba ejerciendo una mayor presión.

2.3 Prueba de desempeño

El correcto funcionamiento de todo el sistema de medición de variables fisiológicas se puso a prueba mediante el acople con el triciclo y con un sistema de medición de variables cinéticas para el control del videojuego [27]. Para las pruebas se tuvieron cinco voluntarios (tres mujeres y dos hombres) entre los 21 y los 54 años (31 ± 12). Para su inclusión en el estudio los sujetos debían tener sus dos miembros inferiores sanos y contar con una buena condición cardiovascular.

Este estudio se realizó bajo los estándares éticos aceptados para la práctica de la investigación descritos en la Declaración de Helsinki de 1975, revisada en 2000 y 2008. El protocolo del estudio fue revisado y aprobado por el Comité de Ética de la Facultad de Medicina de la Universidad de Antioquia para el proyecto *Evaluación de estrategia combinada para mejorar la adherencia de sujetos amputados por Artefactos Explosivos Improvisados AEI al uso de prótesis de miembro inferior de bajo costo* financiado por Minciencias en la convocatoria 808-2018.

La prueba de desempeño diseñada constaba de siete etapas las cuales se podían realizar en aproximadamente cinco minutos. Cada una de estas etapas podían ser estáticas, donde el sujeto debía permanecer quieto; o dinámicas en las cuales el sujeto debía hacer algunos movimientos determinados. Las etapas se dividían así: 1) sujeto sentado en el triciclo sin pedalear, se monitorean las variables en estado basal, 2) el sujeto debe pedalear a una velocidad relativamente constante mientras se realizan tres incrementos en la relación de velocidades con los cambios del triciclo cada uno de 30 segundos, 3) el sujeto descansa durante 30 segundos, 4) el sujeto realiza un pedaleo lento durante 15 segundos y seguidamente debe pedalear a gran velocidad durante otros 15 segundos, 5) el sujeto descansa durante 30 segundos, 6) el sujeto debe seguir unas instrucciones dadas por el encargado de la prueba para mover la bicicleta mientras imagina ciertas situaciones, las instrucciones se repiten dos ocasiones y posteriormente el sujeto puede usar libremente el triciclo pedaleando, frenando y girando el manubrio mientras sus datos fisiológicos son registrados, y 7) con el sujeto sentado y sin pedalear, se monitorean las variables durante 30 segundos. La Figura 12 resume las etapas que hacían parte de la prueba de desempeño.

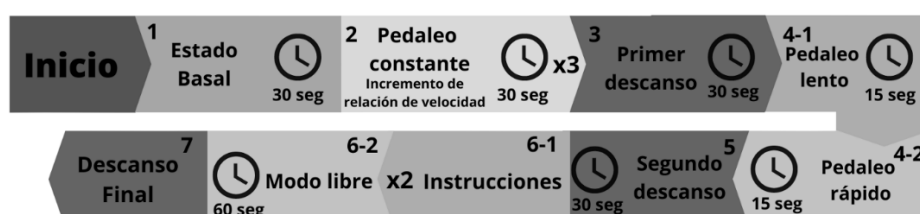


Figura 12. Etapas de la prueba de desempeño del sistema. A lo largo de las 7 etapas se registraban las variables fisiológicas de los sujetos, así como las variables mecánicas del triciclo que hicieron parte de otro estudio paralelo

Al finalizar la prueba, a cada sujeto se le realizó un cuestionario que tenía dos objetivos, el primero era evaluar la usabilidad del triciclo, cuyos resultados fueron de utilidad para el trabajo de [27]. Mientras que el segundo objetivo pretendía evaluar el esfuerzo físico que realizaron los sujetos durante la prueba, por lo cual fue de mayor interés para el presente proyecto. El cuestionario contaba con 15 preguntas, de las cuales seis eran de respuesta cerrada y nueve de respuesta abierta.

Las preguntas cerradas consistían en afirmaciones sobre las cuales el sujeto debía calificar en una escala, de 1 a 5, su nivel de acuerdo o desacuerdo, siendo 1 *totalmente en desacuerdo* y 5 *totalmente de acuerdo*. Por otro lado, las preguntas abiertas, requerían una opinión o descripción de lo experimentado durante la prueba. De todas estas preguntas, las dos de mayor provecho para este estudio fueron *¿Cómo se sintió al terminar el ejercicio?* y *¿Qué piensa acerca de la duración de la prueba?*. Sin embargo, también se tuvieron en cuenta las preguntas *¿Hubo dificultades técnicas durante la sesión?* y *¿Algunas partes del dispositivo fueron incómodas?* para determinar si se debían realizar ajustes al sistema de medición de variables fisiológicas.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Sistema implementado

Los subsistemas de obtención y acondicionamiento de la señal pletismográfica, la frecuencia cardiaca, la señal de esfuerzo torácico, la frecuencia respiratoria y la distribución de presión fueron unidos en un único sistema y acoplados al triciclo utilizado como simulador en el manejo del videojuego serio, tal y como se observa en la Figura 13.



Figura 13. Sensores acoplados al triciclo: A) Sensor de pulso en el dedo pulgar de la mano izquierda y ubicado en el manubrio. B) Sensor de frecuencia respiratoria ubicado debajo del pecho. C) Cojín de distribución de presión en el asiento del triciclo

El sensor de pulso se ubica en la parte izquierda del manubrio y se ajusta al dedo pulgar del sujeto. El sensor de distribución de presión se ubica sobre el asiento del triciclo y se recubre con una tela de protección que permite usarlo como un cojín, mientras que el circuito de acondicionamiento con el ESP32 se ubica debajo del asiento. El sensor de respiración se ajusta alrededor del pecho o abdomen del sujeto y este puede usarlo mientras se encuentra sentado pedaleando en el triciclo. El sistema de control y el PSoC se ubican en la parte trasera del triciclo sobre la parrilla.

Para los sistemas de medición de frecuencia cardiaca y frecuencia respiratoria se diseñó una tarjeta impresa que contenía el PSoC 5, los conectores para alimentar los sensores, los componentes pasivos para el filtrado y acondicionamiento y unos LEDs de estado. Esta tarjeta brinda una mayor estabilidad y robustez al sistema, para de esta forma reducir el número de posibles fallos y errores. En la Figura 14 se observa el esquemático de la tarjeta electrónica diseñada en la que se notan diferentes bloques donde el A y el D, son los de mayor importancia, ya que es donde se conectan los sensores y se realiza el acondicionamiento de las señales respectivamente. En el bloque B se observan botones y switches para tarar y configurar el sistema; en lo que respecta al bloque C están todos los indicadores visuales LED o auditivos.

Por último, está el E, que tiene acceso a todos los pines del PSoC en caso de que se deseen añadir más componentes o módulos en un futuro. Finalmente, con este esquemático se diseñó la tarjeta electrónica de dos capas que se ve en los bloques F y G.

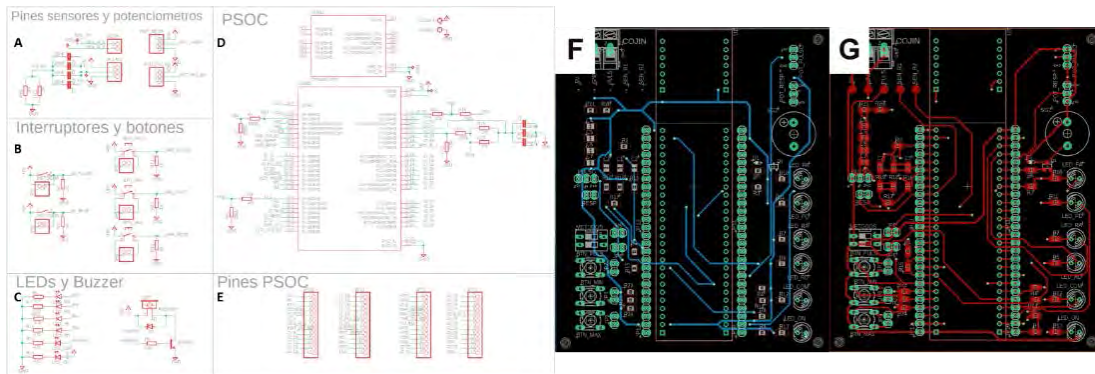


Figura 14. Esquemático y tarjeta electrónica para variables fisiológicas: A-E) bloques del esquemático; F) capa inferior de la tarjeta; G) capa superior de la tarjeta electrónica

Para la conexión eléctrica se puede observar en la Figura 15 como los tres sistemas de medición de señales fisiológicas fueron finalmente conectados al centro de control para funcionar simultáneamente desde la Raspberry Pi. Este centro de control se comunica con el ESP32 y con el PSoC 5 por puertos UART emulados para obtener los valores procesados de las señales y los valores calculados de las frecuencias cardíaca y respiratoria. Dicho centro de control también captura las variables mecánicas del triciclo que son usadas para controlar el movimiento del vehículo virtual dentro del juego serio. Todo el sistema tuvo la capacidad de funcionar sin inconvenientes y de manera modular.

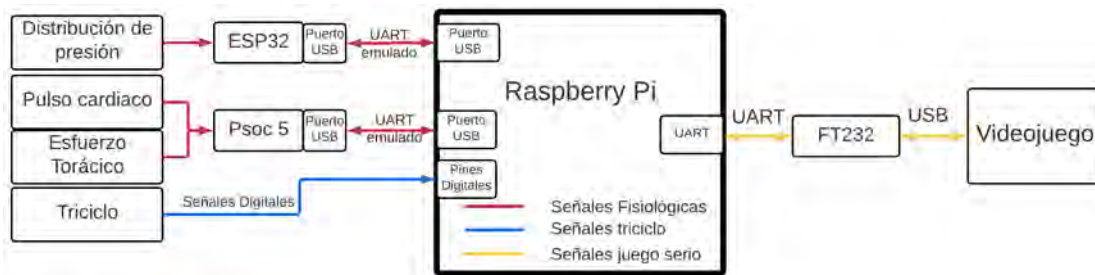


Figura 15. Diagrama de interconexiones de sensores diseñados con el centro de control. Se muestran como el PSoC 5 y el ESP32 se conectan mediante puerto UART emulado a la Raspberry Pi

3.2 Resultados de calibración

El sistema integrado obtenido fue evaluado mediante pruebas de calibración e inspección visual para evaluar la capacidad del sistema para generar información que se corresponda con el comportamiento real de las variables fisiológicas de un paciente, tanto para las formas de las ondas como para las frecuencias y distribuciones esperadas a partir de los protocolos de evaluación establecidos.

3.2.1 Forma de onda y medida de frecuencia cardíaca

Durante la calibración del sistema de medición de frecuencia cardíaca se obtuvo que para 41 valores de entrada se obtuvo a la salida un valor esperado de frecuencia de gran precisión con errores máximos de ± 1 bpm en dicho intervalo (Figura 16). La regresión lineal entre ambos valores muestra un valor de R^2 de 0.999 sugiriendo que el algoritmo de medición desarrollado está ajustado y es preciso al menos en 1bpm. Este método utilizado permitió analizar el algoritmo por aparte del circuito de acondicionamiento.

Según lo anterior, la capacidad del sistema para obtener valores de frecuencia cardíaca a partir de una señal cuadrada se puede considerar como suficientemente confiable para el uso esperado del sistema. El intervalo de frecuencias implementado fue suficientemente útil ya que las estimaciones de nivel de actividad física de una persona a partir de la frecuencia cardíaca se realizan por rangos amplios de frecuencias o zonas cardíacas. Dichos rangos definen si el estado fisiológico se corresponde con actividad de reposo o ejercicio intenso, aeróbico, anaeróbico o esfuerzo máximo. De esta manera, el error de 1 bpm obtenido en el sistema se torna irrelevante para la estimación del efecto en el aumento de la actividad cardiovascular.

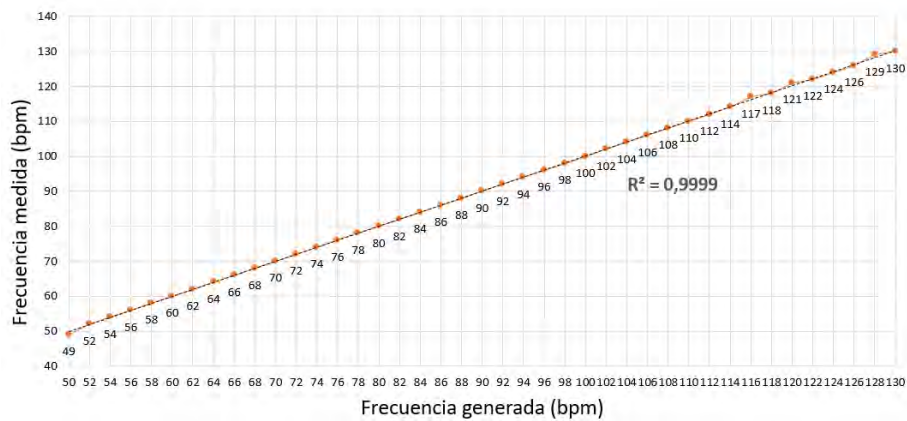


Figura 16. Curva de correlación entre frecuencias generadas como muestra de las frecuencias cardiacas normales y las frecuencias medidas mediante el sistema desarrollado para el procesamiento de la señal pletismográfica del pulso

Sin embargo, la correspondencia del sistema con la frecuencia cardiaca real depende de la forma de la onda de pulso obtenida mediante el sensor y el acondicionamiento de su señal dentro del PSoC, por lo que se realizó la inspección visual del grupo de curvas pletismográficas del pulso de cinco sujetos que se observa en la Figura 17.

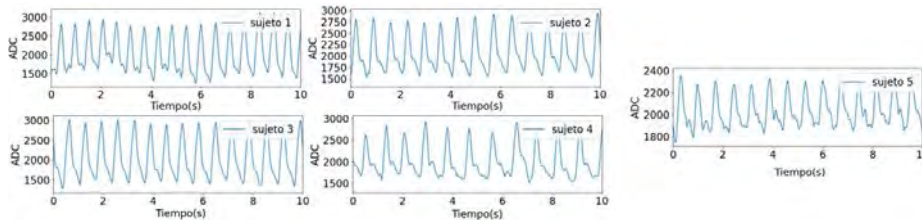


Figura 17. Grupo de señales pletismográficas del pulso cardíaco para la inspección visual del desempeño del sistema para la obtención y procesamiento de las señales

La señal obtenida en todos los casos se corresponde con lo esperado para una señal de pulso, además, contienen entre sí factores similares como los rangos de amplitud de valores ADC y la periodicidad constante. Cabe destacar que en curvas como la del sujeto 1 y el sujeto 4, se observa un ruido de baja frecuencia que genera leves cambios periódicos en los picos máximos de las señales, sin embargo, son el resultado de la atenuación de ruidos de baja frecuencia de mayor amplitud que deformaban completamente la señal, de forma que a pesar de estos defectos y gracias a la naturaleza de la señal, las formas de las ondas permiten obtener sin problema la señal cuadrada para el posterior cálculo de frecuencia, a través de la comparación con los umbrales digitales o analógicos.

3.2.2 Forma de onda y medida de frecuencia respiratoria

Las señales adquiridas y normalizadas durante el proceso de calibración se muestran en la Figura 18. Es posible observar mediante inspección visual cómo las dos señales están desfasadas de manera constante. Este desfase se debe a que la señal de flujo de aire y la señal de volumen torácico miden fenómenos fisiológicos diferentes que están sincronizados en frecuencia, pero desfasados en el tiempo. Estas señales fueron de utilidad para calcular la frecuencia respiratoria de referencia y la frecuencia respiratoria medida por el sistema. La comparación de las dos frecuencias respiratorias se puede apreciar también en la Figura 18, donde se tienen la frecuencia de cada señal para cada instante de tiempo calculada con un promedio móvil de tres ciclos.

El comportamiento del valor de frecuencia respiratoria en el tiempo para ambos dispositivos fue bastante similar, mostrando una correlación de 0.95, donde el error fue de $0,58 \text{ BPM} \pm 0,62 \text{ BPM}$. Además, ambas siguen la dinámica esperada según el experimento diseñado, comenzando con una frecuencia respiratoria baja que posteriormente aumenta y luego vuelve a disminuir. Es necesario aclarar que en los primeros segundos no se tiene reporte de alguna frecuencia, ya que para el cálculo de esta eran necesarias al menos tres respiraciones.

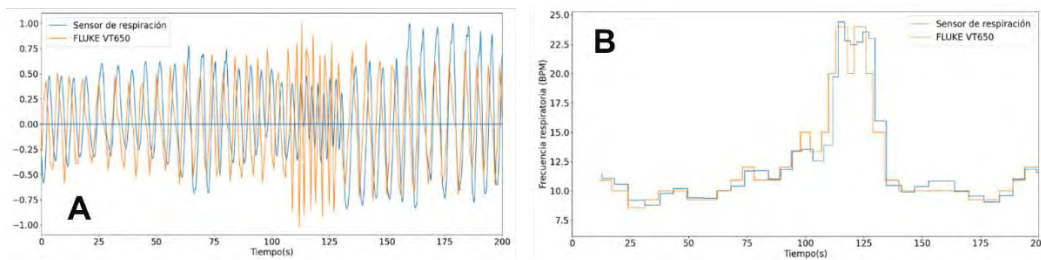


Figura 18. A) Señales normalizadas para calibración del sensor de frecuencia respiratoria. El desfase entre las señales es constante y se debe a que la señal proviene de mediciones físicas diferentes. B) Frecuencia respiratoria vs Tiempo calculada con promedio móvil en ventanas de 3 ciclos para las dos señales

Finalmente, para verificar que la señal respiratoria estaba correctamente acondicionada con el circuito del PSoc se realizó la visualización de la señal de los cinco sujetos en reposo como se detalla en la Figura 19, donde de los cinco sujetos se observa que en cuatro se tienen señales con comportamientos coherentes con el esfuerzo torácico durante el proceso de la respiración en reposo con señales periódicas. Sin embargo, para el sujeto 5, el comportamiento de la señal no fue el esperado y esto posiblemente ocurrió porque la contextura física del sujeto dificultó la correcta ubicación del sensor justo debajo del pecho y con la correcta deflexión inicial. Además, el sensor no quedó fijo en una sola posición durante toda la prueba generando movimientos de flexión y extensión adicionales al esfuerzo torácico. Esto demuestra que el correcto posicionamiento del sensor es fundamental antes de realizar monitoreos en los sujetos.

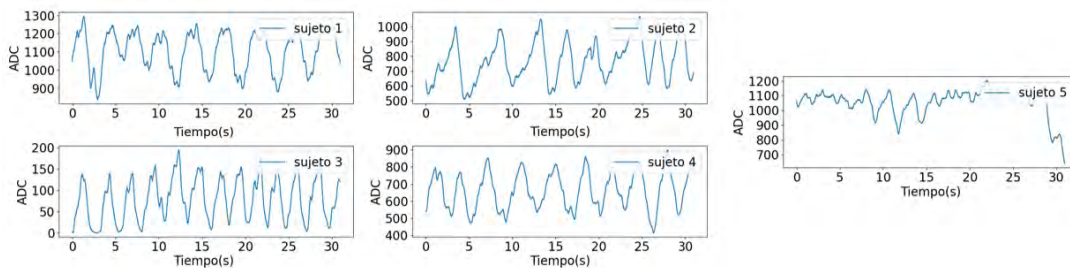


Figura 19. Grupo de señales respiratorias para la inspección visual de la forma de onda proveniente del esfuerzo torácico para la obtención de la frecuencia respiratoria

3.2.3 Respuesta a la presión sobre el asiento

Los resultados de la prueba de calibración se aprecian en la Figura 20. Se muestra una matriz de cuadros en una escala de color verde hasta amarillo donde los puntos en los que se ejerce mayor presión tendrán un color más amarillo e intenso correspondiente con la presión sensada por ese punto del cojín en particular. En los lugares donde no se detecta presión el color observado es un verde oscuro. Dicha matriz fue visualizada en una pantalla de computador luego de ser procesada en tiempo real dentro del centro de control.

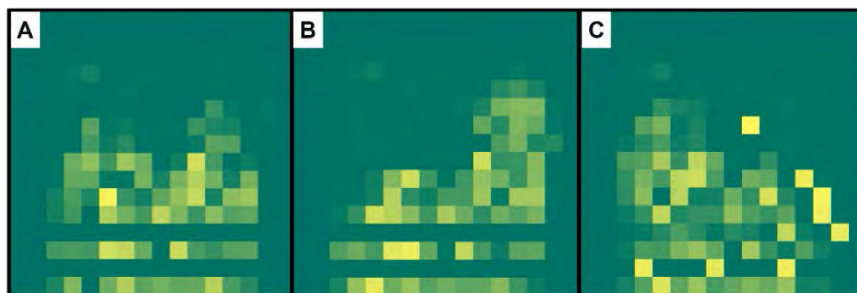


Figura 20. Distribución de presión en el cojín: A) Sujeto en estado de reposo, B) Sujeto pedaleando mientras la pierna derecha está apoyada en cojín, C) Sujeto pedaleando mientras la pierna izquierda está apoyada en cojín

En el primer recuadro, un sujeto estaba sentado sobre el triciclo con el sensor o cojín puesto sobre la silla. Pude observarse como la distribución de presión alcanza a detectar los dos muslos y el glúteo en reposo. En el segundo recuadro, el sujeto estaba sentado solo sobre la pierna derecha y el sensor logró captar dicha

distribución de presión de interfaz. Finalmente, el último recuadro muestra la distribución de presión cuando el sujeto estaba sentado solo sobre su pierna izquierda.

3.3 Prueba de desempeño

Durante las pruebas se recolectaron las señales y las frecuencias de la respiración y el pulso cardiaco, mientras que para la distribución de presión se recolectaron y reconstruyeron las matrices enviadas al centro de control para generar un video donde se observara la respuesta de cojín durante toda la prueba descrita en la sección de metodología.

La frecuencia cardiaca, como era de esperarse, incrementa a lo largo de las primeras cinco etapas muy posiblemente debido al incremento gradual del esfuerzo circulatorio necesario para cumplir la prueba. Sin embargo, en la etapa siete que correspondía al descanso final, la variación del valor de la frecuencia cardiaca dependía del nivel de esfuerzo que el sujeto realizó después de la etapa libre. Por ejemplo, el sujeto 2 realizó una etapa libre a baja velocidad y sin realizar esfuerzos. Por lo tanto, su valor de frecuencia cardiaca al final disminuyó considerablemente.

En cambio, el sujeto 1 realizó una etapa libre a alta velocidad y esfuerzo y por ende el tiempo de recuperación no fue suficiente para estabilizar su frecuencia cardiaca a los valores iniciales. En el resto de los sujetos se notó también un buen comportamiento, donde hay momentos, como en la etapa tres, en que la frecuencia cardiaca disminuye un poco, pero debido a que fue una etapa de reposo durante la prueba. Todo esto indica que el sistema de medición de frecuencia cardiaca realiza un buen trabajo siempre y cuando el sensor no se desajuste o no sea apretado fuertemente contra el manubrio por el sujeto. En la primera parte de la Figura 21 se presentan las frecuencias cardiacas promedio que obtuvo cada uno de los sujetos para cada una de las etapas.

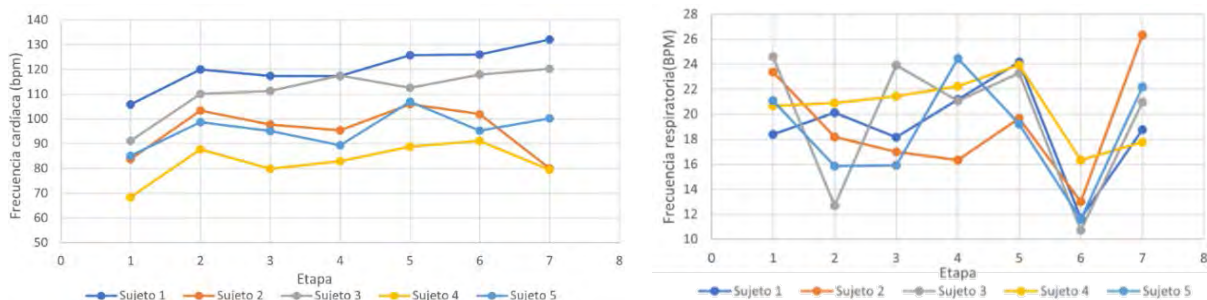


Figura 21. Frecuencia cardiaca y frecuencia respiratoria promedio de los sujetos durante cada etapa

Con relación a la frecuencia respiratoria, cuyos resultados se ven la segunda parte de la Figura 21, se puede observar que en la etapa seis, también llamada etapa libre, el valor de dicha frecuencia disminuyó para todos los sujetos y posteriormente en la etapa final, está incrementó nuevamente a los valores basales o cercanos a estos.

Por esta razón se realizó una inspección visual a las señales de los sujetos y efectivamente se observa momentos donde el valor ADC era nulo o con tendencia constante como si se estuviera manteniendo el aire o se dejara de detectar señal. Sin embargo, en la mayoría de las etapas se observa un buen comportamiento del valor promedio, especialmente aquellas en las cuales el sujeto se encuentra en reposo, mientras en las que debía pedalear se presentaron inconvenientes en algunos sujetos, muy posiblemente debido al movimiento del cuerpo durante el ejercicio.

La posible razón de los errores presentados en las etapas dinámicas, especialmente en la sexta etapa, es que con el movimiento la correa donde se encontraba el sensor de respiración se desplazaba haciendo que quedara en una posición en la cual no detectaba los cambios de volumen torácico. Además, es probable que con el movimiento en algún momento se presentara señales adicionales que alteran la señal original. Todo esto muestra que, aunque el sensor si es capaz de realizar mediciones correctas de la frecuencia respiratoria en estado basal, es muy sensible al movimiento y a la ubicación alrededor del pecho de un sujeto causando problemas en la correcta obtención de la señal proveniente del esfuerzo torácico.

Respecto a los videos elaborados a partir de los datos obtenidos de la distribución de presión pudo distinguirse visualmente cuando el sujeto está en reposo en comparación a cuando está pedaleando. En el primer caso se alcanza a observar simetría en cuanto al número e intensidad con que se activaron los sensores, apreciando claramente la forma de estructuras corporales como los glúteos y la parte posterior de los muslos. En el segundo caso, se pudo detallar que la presión se desplazaba entre los laterales de la zona de apoyo.

Sin embargo, lo anterior pudo evidenciarse con claridad únicamente en aquellos intervalos donde el pedaleo se realizó de forma lenta, mientras que para velocidades de pedaleo altas el sistema no pudo detectar los cambios de forma continua, sino que se apreciaron diferencias significativas entre fotogramas consecutivos, demostrando que la frecuencia de muestreo conseguida no era lo suficientemente rápida para detectar correctamente dichos cambios y por ende el análisis de diferencias entre etapas no fue posible realizarlo.

Finalmente, se tienen las apreciaciones que tuvieron los sujetos sobre el sistema y la prueba por medio del cuestionario. Sus respuestas se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Respuestas del cuestionario realizado al finalizar las pruebas.

Pregunta/Sujeto	S1	S2	S3	S4	S5
¿Hubo dificultades técnicas durante la sesión?	Si, no se logró medir la distribución de presión	Se demoró el proceso de calibración del sensor de frecuencia respiratoria	No	No	No
¿Algunas partes del dispositivo fueron incómodas?	Un poco el asiento	No	Los tornillos de la correa del sensor de respiración	No	Ninguna
¿Cómo se sintió al terminar el ejercicio?	Un poco cansado y agitado	Bien, me estaba empezando a sentir agitada luego de la prueba	Muy cansada	Un poco agitado	Bien
¿Qué piensa acerca de la duración de la experiencia?	Estuvo un poco larga	Es adecuada	Fue el tiempo justo	Aceptable	Fue bueno

En cuanto a la usabilidad del sistema se presentaron problemas con la distribución de presión y con la frecuencia respiratoria. En el caso de la distribución de presión no se almacenaron los primeros datos del sujeto uno debido a que no se activó el almacenamiento de datos del cojín. Sin embargo, se pudo corregir para las pruebas siguientes.

Por otro lado, para la frecuencia respiratoria hubo demoras durante el proceso de ajuste inicial buscando que se lograra capturar la señal de la mejor manera. Se detectó que encontrar la posición óptima del sensor alrededor del sujeto no fue un proceso trivial y podía llegar a tomar algunos minutos; otra problemática presentada fue la incomodidad causada por los algunos elementos del acople del sensor de respiración a la correa, lo cual se podría solucionar cambiando las dimensiones de dichos elementos.

Ahora, en cuanto al estado físico de los sujetos, la mayoría finalizaron un poco cansados y sudados, lo cual es consistente con el aumento en la frecuencia cardíaca en comparación con la que mostraron en estado basal. En cambio, para la respiración, como se mencionó anteriormente, no se observó un aumento considerable en su frecuencia, a pesar de que los sujetos mencionaran que estaban agitados y algunos incluso consideraron la prueba como larga.

4. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado para el monitoreo de variables fisiológicas en usuarios de un juego serio de realidad virtual mostró resultados satisfactorios, gracias a que permitió integrar todas las señales del sistema en cuestión, para generar registros únicos por usuario donde se evidencia la correlación entre niveles de actividad física y cambios en las frecuencias, cardíaca y respiratoria, para la muestra de sujetos

seleccionada. Sin embargo, sistemas como el diseñado y desarrollado para medir la frecuencia respiratoria podrían mejorarse en cuanto a su dependencia de la posición del cuerpo y el movimiento del mismo, debido a que se observó que los umbrales digital y analógico obtenidos durante el ajuste inicial, pueden dejar de ser efectivos para generar señales cuadradas por el corrimiento del rango de la señal hacia valores que no cruzaban dicho umbral, todo generado por el movimiento del dispositivo a lo largo del tronco, causado a su vez por el movimiento del usuario al utilizar el triciclo.

A pesar de lo anterior, el excelente comportamiento del subsistema de medición de la frecuencia cardiaca, sumado al éxito parcial del subsistema de medición de la frecuencia respiratoria, abren la posibilidad de obtener un sistema mejorado que permita la estimación cuantitativa del *cybersickness* que podría generar el uso del juego serio de realidad virtual durante sesiones prolongadas y, además, poder hacer estudios longitudinales del progreso cardiovascular.

El sistema implementado para medir la distribución de presión durante el uso del triciclo como sistema de control del juego serio mostró una buena adaptabilidad para la integración al sistema y la capacidad de detectar las diferentes posiciones durante el pedaleo. Sin embargo, se concluye que dicho sistema requiere un aumento en la frecuencia de muestreo para evitar el *aliasing* de las señales durante intervalos de pedaleo con alta velocidad, de forma que pueda identificarse la distribución del peso aún en estos casos, y no únicamente durante pedaleos lentos, para así lograr identificar si se presentan asimetrías en la distribución durante pruebas de ejercicio intenso y prolongado en pacientes amputados al usar el simulador para rehabilitación.

Con base en lo experimentado, particularmente con el sistema para la medición de la frecuencia respiratoria, se considera que una mejora pertinente para el sistema sería el desarrollo de métodos de obtención de umbrales que se ejecuten de forma automática y en tiempo real, de forma que el procesamiento de las señales se adapte constantemente a los cambios que pueden sufrir los sistemas físicos para captura de variables, por causa del movimiento del usuario durante el uso del juego serio.

Los buenos resultados del sistema en general son muy prometedores para el monitoreo integrado de variables fisiológicas durante el uso del juego serio implementado, sin embargo, debe tenerse en cuenta que la suficiencia de los procesos de calibración llevados a cabo se basa en que el objetivo del sistema es la estimación de la actividad física asociada al juego serio, mas no la obtención de un dispositivo médico de diagnóstico, lo cual requeriría procesos de validación más rigurosos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Minciencias por la financiación parcial del proyecto *Evaluación de estrategia combinada para mejorar la adherencia de sujetos amputados por Artefactos Explosivos Improvisados (AEI) al uso de prótesis de miembro inferior de bajo costo* a través de la Convocatoria para proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación y su contribución a los retos de país – 808, que permitió que el grupo GIBIC y los autores realizaran el presente estudio. De igual manera se agradece a Julián Pineda Escobar, Manuela Gómez Correa y Sofía Agudelo Zapata por el apoyo en la recolección de datos y en el desarrollo e integración de todos los módulos asociados a la estrategia de rehabilitación de personas con prótesis de miembro inferior basada en el uso del triciclo y un juego serio de realidad virtual. También se agradece a todos los miembros de la Corporación Mahavir Kmina por permitir el uso de sus instalaciones para la realización de las pruebas y el apoyo en la selección de los participantes. También se agradece a los cinco voluntarios que participaron en la evaluación de la prueba de desempeño y contestaron muy amablemente el cuestionario.

REFERENCIAS

- [1] Rego P. et al. (2010). Serious Games for Rehabilitation: A survey and a classification towards a taxonomy. En 5th Iberian Conference on Information Systems and Technologies. Santiago de Compostela, España.
- [2] González C. (2019). Serious games for rehabilitation: Gestural interaction in personalized gamified exercises through a recommender system. Journal of Biomedical Informatics 97, 103266.
- [3] Tecnológico de Monterrey. (2018). ¿Qué son los Serious Games? Recuperado: <https://observatorio.tec.mx/edu-news/que-son-los-serious-games>

- [4] Oesch P. et al. (2017). Exergames versus self-regulated exercises with instruction leaflets to improve adherence during geriatric rehabilitation: a randomized controlled trial. *BMC Geriatrics* 17(1), 77-85.
- [5] Broeren J. (2004). Virtual reality and haptics as a training device for movement rehabilitation after stroke: a single-case study. *Archives of physical medicine and rehabilitation* 85(8), 1247-125.
- [6] Deutsch J. (2012). Fitness improved for individuals post-stroke after virtual reality augmented cycling training. En 9th International conference on disability virtual reality & associated technologies. Laval, Francia.
- [7] Betker A. (2007). Game-based exercises for dynamic short-sitting balance rehabilitation of people with chronic spinal cord and traumatic brain injuries. *Physical therapy* 87(10), 1389-1398.
- [8] Rossito G. et al. (2015). Designing, Using and Evaluating a Serious Game for Balance Improvement on Elderly People. En 14th SBGames - Brazilian Symposium on Games and Digital Entertainment. Porto Alegre, Brazil.
- [9] Ma M. y Bechkoum K. (2008). Serious games for movement therapy after stroke. En IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 1872-1877.
- [10] Cameirão M. (2007). A virtual reality system for motor and cognitive neurorehabilitation. *Challenges for assistive technology* 20, 393-397.
- [11] Charoensook T. (2019). Heart Rate and Breathing Variability for Virtual Reality Game Play. En IEEE 7th International Conference on Serious Games Applications. Kyoto, Japan.
- [12] Wiederhold M. (2019). Physiological monitoring during augmented reality exercise confirms advantages to health and well-being. *Cyberpsychology, behavior and social networking* 22(2), 122-126.
- [13] Magaki T. y Vallance M. (2016). Real-time monitoring method for cybersickness using physiological signals. En 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. Sydney, Australia.
- [14] Caro S. et al. (2020). Capture system of horizontal bicycles' kinetic variables for simulation. *Visión electronica* 14(2) 236-246.
- [15] Freundlich J. y Erickson J. (1974) Electrical impedance pneumography for simple nonrestrictive continuous monitoring of respiratory rate, rhythm, and tidal volume for surgical patients. *Chest*. 65(2), 181-184.
- [16] Posthuma L. (2020). Insights into postoperative respiration by using continuous wireless monitoring of respiratory rate on the postoperative ward: A cohort study. *Journal of Clinical Monitoring and Computing* 34(6), 1285-1293.
- [17] Tamura T. (2014) Wearable photoplethysmographic sensors—past and present. *Electronics* 3(2), 282-302.
- [18] Ginsburg A. (2018). A systematic review of tools to measure respiratory rate in order to identify childhood pneumonia. *American journal of respiratory and critical care medicine* 197(9) 1116-1127.
- [19] Fay B. y Brienza D. (2000) What is interface pressure? En 22nd annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society.
- [20] Quintero C. (2015). Estudio descriptivo de condiciones del muñón en personas usuarias de prótesis de miembros inferiores. *Revista Colombiana de Medicina Física y Rehabilitación* 25(2), 94-103.
- [21] Sakai K. et al. (2009). Continuous monitoring of interface pressure distribution in intensive care patients for pressure ulcer prevention. *Journal of advanced nursing* 65(4), 809-817.
- [22] Marenzi E. (2013). Capacitive sensors matrix for interface pressure measurement in clinical, ergonomic and automotive environments. En Euromicro Conference on Digital System Design. Los Alamitos, Estados Unidos.
- [23] Valle D. et al. (2017). Test and Fabrication of Piezoresistive Sensors for Contact Pressure Measurements in Biomedical Applications. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 82, 47-52.
- [24] Hernández A. et al. (2020). Dispositivo de medición de presión que incluye un sensor piezorresistivo multicapa para prevenir la formación de escaras. Patente de invención NC2020/0001343.
- [25] Cypress Semiconductor Corporation. (2017). Datasheet CY8C5888LTI-LP097 Microcontrollers.
- [26] Hill B. y Annesley S. (2020) Monitoring respiratory rate in adults. *British Journal of Nursing* 29(1), 12-16.
- [27] Caro S. (2022). Verificación de la integridad de los datos adquiridos por un sistema de medición de variables cinéticas, cinemáticas y fisiológicas, ajustado a una bicicleta horizontal en conexión con un juego serio. Trabajo de grado. Universidad de Antioquia. Colombia.

Diseño de un prototipo de balanza electrónica IoT para la medición de residuos orgánicos aprovechables en unidades residenciales

Ángel Alejandro Rodríguez Aya¹
Ramiro Hernán Polanco Contreras²
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Colombia

En este capítulo se presenta el avance del diseño de una balanza electrónica tecnología del Internet de las Cosas IoT para la medición de residuos orgánicos aprovechables en hogares del municipio de Villavicencio, Colombia. Se relacionan las mediciones preliminares manuales de los residuos orgánicos y el diseño de hardware y software utilizados y necesarios para aplicar IoT. El prototipo de la balanza electrónica se desarrolló con la integración de una tarjeta Arduino Nano, una tarjeta ESP-01 y una celda de carga de 5Kg con un módulo HX711, capaz de medir la masa en gramos (g) depositada en su contenedor, permitiendo el envío de la información en intervalos de tiempo definidos por una red Wifi de 2,4Ghz a la plataforma ThingSpeak. Se tiene como resultados preliminares errores inferiores al 2% en el envío de información entre el prototipo y ThingSpeak, y un ahorro de energía superior al 97,6%, aplicando el modo de bajo consumo en el microcontrolador implementado.

¹ Ingeniero Electrónico, Especialista en Alta Gerencia y Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.

Contacto: angel.rodriguez@unad.edu.co

² Ingeniero Industrial, Magíster en Relaciones Industriales y Estudiante de Doctorado en Economía, Pobreza y Desarrollo.

Contacto: ramiro.polanco@unad.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En términos globales Colombia y en particular Villavicencio como ciudad intermedia se privilegia al disponer de sistemas bióticos con características únicas, sin embargo, el aumento poblacional y su búsqueda de nuevos entornos para establecerse acompañado de un consumo de recursos en aumento promueve la generación de residuos, en muchos casos con una incorrecta disposición final, aumentando el riesgo de afectación en los recursos. Según [1] en el país se dispuso alrededor de 30.081 toneladas de residuos por día en 2017, aunque en el mismo informe se conoció que 282 municipios del país no reportaron información en el Sistema Único de Información SUI, y solo se cuenta con información parcial capturada por diferentes fuentes. En esta misma dirección, se identificó que los sólidos generados en Colombia, cerca del 40%, podrían aprovecharse, pero según la Misión de Crecimiento Verde del Departamento Nacional de Planeación DNP, solamente se recicla alrededor de 17% [2].

Es innegable que los residuos sólidos orgánicos se generan en grandes cantidades, son de los menos aprovechados y teniendo en cuenta que residuo orgánico puede ser cualquier tipo de material de origen animal o vegetal que pasa por un proceso de descomposición en el que participan microorganismos, las fuentes más recurrentes de este tipo de materiales en áreas urbanas son podas, hojas, residuos de madera en tamaños pequeños, desechos de cocina tales como frutas y hortalizas, alimentos estropeados o caducados, cáscaras de huevo, restos de café, té e infusiones, incluso aceites y grasas comestibles en pequeñas cantidades, servilletas, pañuelos de papel, papel y cartón y cortes de pelo o residuos de esquilado de animales.

En el contexto particular de la ciudad de Villavicencio en promedio al día, se recogen 400 TON de residuos entre residuos ordinarios, barrido y poda. La disposición final utiliza celdas a donde llega todo el material, se hace la aclaración que existe una ruta de aprovechables y de escombros cuyo tratamiento es diferente y no se dirige al relleno. En promedio cada micro ruta recolecta 16 TON en temporada normal, mientras que, en temporadas de mayor afluencia de turistas en la ciudad, se aumenta considerablemente. Los días que requieren un mayor uso del tiempo son lunes y martes debido a la acumulación de los residuos del fin de semana teniendo como efecto que cada turno se extiende de 8 a 10 o 12 horas de operación, cada vehículo cuenta con una plantilla de personal compuesta por un conductor y dos operarios. La planta de personal cuenta con operarios para cubrir las necesidades de ausentismo [3].

Con base en información del operador de recolección se identifican dos grupos de residuos sólido entendido este como ... cualquier objeto, material, sustancia o elemento principalmente sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios (...) igualmente, se considera como residuo sólido, aquel proveniente del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda de árboles, en cuyo caso se pueden agrupar en dos categorías, una correspondiente a aprovechable ... que es susceptible de aprovechamiento para su reincorporación a un proceso productivo [4].

En un modelo de economía circular la elaboración de nuevos productos a base de material reciclable RCD, propende por disminuir las afectaciones al medio ambiente e implementar nuevas estrategias, así los materiales recuperados se pueden reincorporar a los ciclos económicos y productivos, mediante procesos de aprovechamiento y valorización, con características de calidad que los hacen potencialmente competitivos respecto a los que se disponen en el mercado y en especial los que tienen que ver con proyectos de desarrollo de infraestructura vial, urbana y construcción de vivienda [5].

Sin embargo en el caso de los materiales orgánicos se requieren procesos adicionales en muchos casos con una duración media en su adecuación para uso, por lo cual cualquier diseño que se pretenda formular requiere una clara caracterización de estos, es en este punto en donde la tecnología soporta la captura y procesamiento de información en tiempo real tomando en cuenta el avance de las Tecnologías de la Información y Comunicación TIC, y su penetración mediante, internet, teléfonos móviles y otras tecnologías digitales, va en aumento en los países de mayor desarrollo, sin embargo los dividendos digitales esperados: mayor crecimiento, más empleo y mejores servicios públicos, están por debajo de las expectativas, y el 60 % de la población mundial sigue sin poder participar en la economía digital en constante expansión [6].

Bajo este marco la formulación y desarrollo de políticas adecuadas a las realizadas en cada país se convierte en uno de los elementos que permitiría el desarrollo a partir de la democratización en la inclusión y acceso a las TIC, más aún cuando los nuevos modelos de desarrollo apuntan a la construcción de nuevas ciudades. En este sentido la tecnología y el procesamiento de datos, si bien no es el único aspecto relevante en las ciudades del futuro, se han ido convirtiendo en el eje central de aquellas cuya visión se orienta en el camino de ingresar al selecto grupo de Smart y abordar los desafíos de las urbes en pro de mejorarlos.

Actualmente, la inmersión de tecnologías emergentes aplicadas a la industria 4.0 [7] están siendo aplicadas también a diversos entornos, un ejemplo de ello son las ciudades inteligentes o Smart Cities [8], una de estas tecnologías es el Internet de las Cosas IoT, el cual parte de un principio de conectar a internet lo que no está conectado, o que todos los dispositivos electrónicos estén conectados a la red de internet para su gestión, monitorización y control [9-11].

Existen diversas aplicaciones de esta tecnología en las ciudades inteligentes, una de ellas es la monitorización de luces públicas en horas de la noche para el ahorro energético [12], por otra parte, también es utilizado para la gestión de zonas de parqueo públicas y determinar su disponibilidad, también se está utilizando para hacer el monitoreo de contenedores de basura [13], con el fin de determinar la ocupación del contenedor y planificar mejor las rutas de recolección, economizando considerablemente el consumo de combustible de los camiones recolectores

Adicionalmente, a nivel de los hogares inteligentes [14] el IoT se está utilizando para controlar los electrodomésticos en el hogar y así economizar tiempo de las personas antes de que lleguen al hogar. Adicionalmente se pueden establecer condiciones de monitoreo y seguridad, puesto que permite validar variables como temperatura, estado de puertas y ventanas para su posible control. Actualmente, el IoT se está implementando a nivel comercial, industrial, académico y en el hogar para controlar dispositivos.

El internet de las cosas no es una tecnología tan reciente, la primera vez que se adoptó este concepto fue [16], quien describió un sistema en el cual los objetos del mundo físico se podían conectar a Internet por medio de sensores. Sin embargo, esta tecnología se comenzó a escuchar e implementar hasta después de 2012 [16], en donde se pudo establecer un equilibrio entre el hardware, software y conectividad para su gestión, los sistemas embebidos IoT comenzaron a bajar de precios y comenzaron a ser accesibles a las comunidades académicas, adicionalmente las plataformas para la conectividad y alojamiento de información comenzaron a ser accesibles a cualquier persona [17] y así progresivamente se comenzó a masificar su aplicación en diferentes escenarios.

La finalidad de este proyecto es validar por medio de la construcción de una balanza electrónica conectada a IoT, la cantidad de material orgánico generado en un hogar, y se tenga la certeza real del monitoreo en Kg de la producción de material orgánico. Esta primera etapa se realizó en 5 hogares de la ciudad de Villavicencio y Acacías de forma manual, los participantes de la toma de las muestras durante los meses de agosto, septiembre y octubre de 2021 entre cada ciclo de recolección de basuras, sin embargo, se desea automatizar el proceso por medio de la balanza electrónica conectada a IoT, con el fin de minimizar los errores humanos por muestras erradas o por la ausencia de la muestra por olvido de la toma de la medición.

2. MÉTODO

2.1 Fase muestreo inicial - Manual

Para el proceso de caracterización de RSD se propuso un muestreo de validación para el proceso de identificación y valoración de la cantidad de residuos generados mediante una prueba piloto a través de captura manual de información mediante un formulario en línea que posee una caracterización general en que se recopila la información:

- Número de celular (se usará para enviar el enlace del formulario a diligenciar según la frecuencia de recolección del operador)
- Frecuencia de recolección de RSD

- Ubicación Unidad Habitacional:
 - Dirección
 - Barrio
 - Sector
- Manejo de residuos
- Separación en la fuente
- Tipología de residuos generados
- Tipo de recipiente usado: caneca, bolsa, caneca y bolsa

Posteriormente, se entregará a cada participante una Balanza Bascula Pesa Dinamómetro Digital 50 Kg Maleta Mano, con las características de la Figura 1.



Figura 1. Balanza Bascula Pesa Dinamómetro

Se remite a los dispositivos móviles un segundo formulario para el reporte y captura de la información teniendo en cuenta la frecuencia de recolección según la ruta definida por el operador.

- Formulario de caracterización de RSD
- Fecha reporte
- Peso residuos reciclables
- Peso residuos generales
- Observaciones

2.2 Diseño del sistema automático de medición

Para el diseño de la balanza electrónica se trabajó con hardware de bajo costo, para este caso con sistemas Arduino, se seleccionó como sistemas principales de procesamiento la Tarjeta Arduino Nano [18], esta es una de las tarjetas predilectas para desarrollar sistemas electrónicos digitales de bajo costo y es ampliamente usada para leer diferentes sensores y controlar diferentes dispositivos electrónicos, como se aprecia en la Figura 2.



Figura 2. Tarjeta Arduino Nano

Para medir la masa en Kg de la balanza electrónica, se utilizó un transductor, para este caso una celda de carga de 5Kg acompañada del convertor Análogo a digital HX711 [19], este convertor análogo a digital posee una resolución de 24 bits, esta gran resolución permite medir las pequeñas variaciones de voltaje que entrega el transductor cuando se desea hacer un comando de conversión [20-22], la corriente de operación está cercano a los 10mA y la comunicación se realiza mediante el protocolo I²C a cualquier dispositivo que soporte dicha comunicación por hardware o software, como se aprecia en la Figura 3.

La tarjeta para realizar la comunicación con la tecnología IoT, está basada en el microcontrador ESP8266 y para este caso su modelo de tarjeta ESP-01, microcontrolador de la empresa Espressif Systems [23], este microcontrolador permite realizar la conectividad a la red inalámbrica Wifi de 2.4 GHz y esta es usada como medio de comunicación entre el microcontrolador de la tarjeta Arduino Nano y la Plataforma ThingSpeak de la empresa MathWorks, como se aprecia en la Figura 4.



Figura 3. Celda de carga de 5kg y conversor HX711



Figura 4. Tarjeta ESP-01

El sistema de la balanza electrónica se compone de los siguientes elementos: la celda de carga está conectada al módulo HX711 y esta se conecta por comunicación I²C a la tarjeta Arduino Nano, este se encarga de hacer el procesamiento de la información [21], previamente es necesario hacer un proceso de calibración y hacer los ajustes para tener mediciones con un porcentaje menor al 1%, esto se debe hacer con pesas de laboratorio para mejorar la exactitud. Para el envío de los datos entre la tarjeta Arduino nano y la ESP-01 se utiliza el protocolo de comunicación serial por software, finalmente, la empresa ThingSpeak [24]. proporciona una librería para poder entender los comandos para el envío de información en donde se incluyen el número del canal y el ApiKey para que se puedan recibir los datos, esto se puede apreciar en la Figura 5.

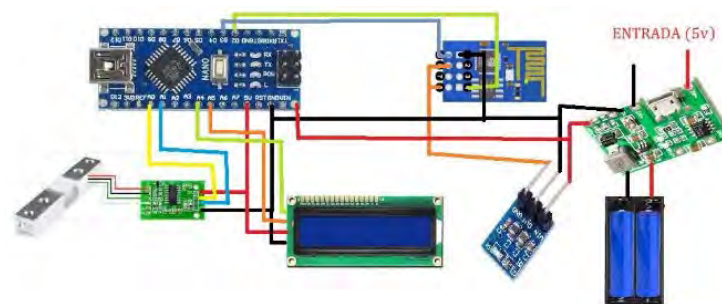


Figura 5. Conexión entre la Arduino Nano y el ESP-01

2.3 Software

El software para desarrollar el algoritmo para las tarjetas fue el IDE de Arduino, este entorno de desarrollo integrado permite hacer la programación de todas las tarjetas de la propia marca, adicionalmente, tiene la posibilidad de utilizar editores externos de tarjetas, lo que permite que el IDE de Arduino incluya la Tarjeta ESP-01 y así poder realizar la programación lenguaje Arduino y no por comandos AT que viene por defecto en la tarjeta ESP-01.

Para realizar la comunicación y almacenamiento de información aplicando IoT, se seleccionó la aplicación de ThingSpeak, como se aprecia en la Figura 6, esta plataforma permite publicar hasta cuatro canales y hasta 8 campos en su cuenta gratuita [24], adicionalmente permite subir datos con intervalos de hasta 20 segundos y el almacenamiento es permanente si no se exceden las cuotas anuales.



Figura 6. Plataforma para IoT ThingSpeak

2.4 Diseño

La idea para el diseño del sistema de Hardware para la balanza electrónica fue que esta sea replicable de manera sencilla, de bajo costo y usabilidad de componentes electrónicos que se trabajan dentro del semillero Renovatio de la UNAD, como primera medida se trabajó con dos tarjetas en vez de una sola, puesto que se contaba con Tarjetas Arduino Nano y era más económico adquirir una tarjeta ESP-01 y no una tarjeta Wemos D1 mini [25], se entiende que con esta última tarjeta se puede hacer todo el sistema, sin embargo el primer prototipo se abordó el uso de estas dos tarjetas.

En cuanto a la estructura física, se construyó con aditamentos de fácil adquisición en cualquier tienda de componentes electrónicos y almacenes de cadena, principalmente la caja para proyectos de electrónica y una cesta que servirá para depositar los residuos orgánicos, como se aprecia en la Figura 7, los demás elementos necesarios para configurar todo el sistema son partes y herramientas menores como tornillos y herramientas de corte para realizar sus acabados.



Figura 7. Construcción y diseño del Sistema físico

Para validar el funcionamiento del hardware se desarrolló primero en protoboard, después de hacer los ajustes pertinentes se implementó en una tarjeta de circuito impreso Universal, como se aprecia en las Figuras 8 y 9, en el cual se conectaron los elementos necesarios para su correcto funcionamiento, adicionalmente se incluyó un sistema de baterías 18650 con una capacidad de 5400mA, con el fin de brindarle autonomía al circuito por si existe intermitencia en el fluido eléctrico externo.



Figura 8. PCB universal con los módulos de Hardware



Figura 9. Diseño físico Final

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Muestreo inicial - Manual

El muestreo inicial recopiló cincuenta y seis registros (56) entre el 6 de agosto y el 4 de octubre del año 2021, como se aprecia en la Tabla 1, en esta tabulación se participó con cuatro unidades familiares en la ciudad de Villavicencio dos de ellas ubicadas en estrato socioeconómico 2 y las otras dos en estrato 3; en todos los casos el ciclo de recolección en la ruta del operador fue de tres veces por semana, coincidiendo en tres de los casos con los días lunes, miércoles y viernes, mientras que en el otro el ciclo fue martes, jueves y sábado.

Tabla 1. Caracterización de la presentación por grupo de RSD

Recipiente de presentación de RSD	Promedio de Peso RSD orgánica	Promedio de Peso RSD biológico	Promedio de Peso RSD reciclable	Promedio de Peso RSD inorgánica
Bolsa	1,360	0,103	0,463	0,211
Suma total	1,360	0,103	0,463	0,211
Participación	63,66%	4,81%	21,66%	9,86%

Una vez procesados los datos se identificó que el recipiente de recolección utilizado en todos los casos es la bolsa plástica y en la presentación del residuo el 63,66% del peso total corresponde a RSD orgánico, seguido de RSD con posibilidad de ese reciclado con un 21,66%, los inorgánicos ocupan un 9,86% y en último lugar los biológicos son el 4,81%; en promedio el peso total presentado al operador en cada uno de los días que corresponden con el ciclo de recolección por unidad familiar fue de 2,16 Kg.

3.2 Funcionamiento del sistema

El sistema construido se encuentra en fase de pruebas, y validación de funcionamiento, por tal motivo se están tomando las mediciones cada 20 segundos a través de la plataforma de ThingSpeak, como se aprecia en la Figura 10, sin embargo, cuando pase el periodo de pruebas se tomará los datos en intervalos de 1 hora, esto permitirá ahorrar recursos de conectividad a la nube de ThingSpeak y consumo energético.

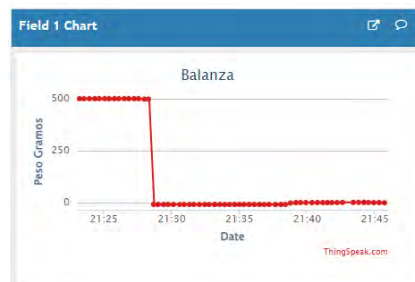


Figura 10. Masa de la balanza IoT en ThingSpeak

3.3 Ahorro de energía

Después de realizar pruebas de consumo energético, se evidenció que la tarjeta ESP-01 tiene un consumo entre los 60mA a 80mA cuando está en funcionamiento, consumo relativamente excesivo para un

microcontrolador que procesa una información basado en un algoritmo de programación, este consumo se presenta aun sin que la tarjeta este conectada a la red Wifi, se pudo establecer la duración en horas D_h promedio del sistema con este consumo aplicando un criterio del 70% total de la capacidad de la carga de la batería, esto se puede evidenciar a través de los cálculos de la ecuación (1).

$$D_h = \frac{\text{Carga total de la batería}}{\text{Consumo del sistema}} * 0,7 \quad (1)$$

$$D_h = \frac{5400mAh}{75mAh} * 0,7 = 50.4 \text{ horas}$$

Con estos requerimientos de consumo y con la aplicación de la ecuación (1), se pudo establecer que la duración del sistema sin alimentación externa sería de aproximadamente 50,4 horas, situación que podría incurrir en pérdida de información al no haber suministro eléctrico al sistema.

Para mejorar el consumo energético y analizando los requerimientos de aplicación, se valida que no es necesario estar midiendo constantemente el valor de la balanza electrónica y la conexión entre la tarjeta ESP-01 y modem Wifi de 2,4Ghz, para ello se indago en el datasheet del fabricante del ESP8266 el modo Deep Sleep, este modo consiste en tres pasos, el primero es realizar una acción, el segundo paso es poner el ESP8266 en modo Deep Sleep y el tercer paso es despertar.

Este modo de Deep Sleep consume 20 μ A según su datasheet, y solo es necesario despertarlo para procesar y enviar la información (tiempo estimado de 20 segundos ejecutando toda la operación) cada hora. Sin embargo, este consumo es de solo el microcontrolador, y para este caso particular se está trabajando el sistema embebido ESP-01, el cual tiene otros elementos que consumen energía, para este caso se hicieron las mediciones y se encontró que el consumo de la tarjeta en modo Deep Sleep es de 1,4mA, para estimar el consumo total del sistema se establece la ecuación (2).

$$D_h = \frac{\text{Carga total de la batería}}{\left(\frac{\text{Consumo del sistema con Deep Sleep}}{\text{Consumo del sistema sin Deep Sleep}}\right)*0.996 + \left(\frac{\text{Consumo del sistema sin Deep Sleep}}{\text{Consumo del sistema sin Deep Sleep}}\right)*0.004} * 0,7 \quad (2)$$

$$D_h = \frac{5400mAh}{(1.4mAh)*0.996+(75mAh)*0.004} * 0,7 = 2179.62 \text{ horas}$$

La nueva configuración del sistema podría llegar a alargar la duración de la batería de 50.4 horas a 2179.62 horas, teóricamente hablando, se podría llegar a pasar de una duración de 2,1 días a una de 90,81 días.

4. CONCLUSIONES

Con base en los datos del muestreo inicial es claro que más de la mitad de los residuos presentados al operador para su disposición final son de carácter orgánico y por ello cuentan con un potencial de aprovechamiento alto, sin embargo en el proceso de toma de información se identificaron dificultades en el proceso de suministro de información por parte de los participantes debido a olvido en el suministro de datos, error en la medición, dificultad para identificar de forma clara el tipo de residuo a ser medido.

El sistema de adquisición de datos de manera automática realizado por medio de la balanza electrónica, permite tener una medición continua y real de la cantidad de residuos orgánicos que se podrían llegar aprovechar en una unidad residencial, lo anterior con el fin de determinar en estudios posteriores la cantidad promedio real de material orgánico aprovechable generado en cada hogar de acuerdo al estrato y ubicación geográfica, lo que brindaría un soporte de mayor peso a investigaciones futuras que intervengan con el posible aprovechamiento del material orgánico, ya sea para composta u otro tipo de proceso que se pueda realizar, minimizando la carga que actualmente se están presentando en los rellenos sanitarios de los municipios de Colombia.

Los valores obtenidos de la balanza electrónica y en comparación con una balanza de laboratorio presenta errores inferiores al 1,4% en la medición de la masa depositada en el recipiente, este porcentaje de error se debe a errores propios de celda de carga, como por ejemplo el estrés de la deformación de los elementos

utilizados al ponerle diferentes valores de masa, este error es despreciable a la naturaleza de la investigación ya que el error por Kg es menor a 14 gramos.

En cuanto a la pérdida de información debido a la comunicación de la tarjeta con ThingSpeak, se ha presentado pérdida de información menor al 2%, lo anterior ocurre cuando no hay comunicación vía internet a la plataforma de ThingSpeak. Este tipo de fallos o errores son pocos sensibles dentro de la futura investigación, ya que el ingreso de material orgánico al contenedor será a intervalos de horas, la variación o ingreso de material orgánico a la balanza se dé una o dos veces por día.

El mejoramiento de consumo energético analizado e implementado en la balanza electrónica IoT, permite aprovechar al máximo el uso de baterías si este fuese necesario, pasando de 2,1 días a 90,81 días se podría establecer una eficiencia energética del 97.6%, sin embargo, se aclara que estos resultados son teóricos, y que en la realidad estas pueden bajar significativamente, puesto que existen factores que pueden provocar la descarga de la batería, como factores ambientales, tales como temperatura, humedad, proximidad del equipo al suelo, consumos no previstos en el sistema, por consiguiente, la disponibilidad de carga de la batería sería inferior, pero en términos de tiempo se podría estimar que al menos el sistema podría llegar a funcionar por un periodo de 30 días continuos sin necesidad de una nueva carga.

En futuras mejoras del sistema, se tiene planteado el uso de una única tarjeta diseñada a medida, en este caso puede ser la misma ESP-01 o por cantidad de pines una Wemos D1 mini, esto permite simplificar las conexiones entre equipos, minimizar ruidos eléctricos, mejorar aún más el consumo energético del todo el sistema.

Este prototipo es el desarrollo de una primera fase inicial de la investigación futura, hasta el momento se está analizando solo la variable masa, sin embargo, más adelante se puede incluir más variables en las etapas del proceso, como, por ejemplo, la humedad, temperatura, emisión de gases, volumen, entre otros; factores que pueden incidir en aplicaciones y procesos de generación de compost orgánico.

REFERENCIAS

- [1] DNP. (2017). Disposición final de residuos sólidos. Departamento Nacional de Planeación
- [2] Monterrosa H. (2019). Colombia podría aprovechar 40% de las toneladas de residuos que genera anualmente. La República 11-10.
- [3] Polanco R. y García D. (2019). Caracterización de la gestión de Residuos. Revista Espacios 40(4), 6-20.
- [4] Bioagícola del Llano. (2019). Glosario. Recuperado: <https://www.bioagricoladelllano.com.co/bio/imagenes/transparencia/Glosario%20final.pdf>
- [5] CEPAL. (2021). Economía circular en América Latina y el Caribe. Oportunidad para una recuperación transformadora.
- [6] Banco Mundial. (2016). Tecnologías digitales: Su enorme potencial de desarrollo aun escapa a los 4000 millones de personas que no tienen acceso a Internet. Recuperado: <https://bit.ly/3AZN1pM>
- [7] Ashima R. (2021). Understanding the role and capabilities of Internet of Things-enabled Additive Manufacturing through its application áreas. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research 5(3), 137-142.
- [8] Syed A. et al. (2021). IoT in smart cities: A survey of technologies, practices and challenges. Smart Cities 4(2). 429-475.
- [9] Gubbi J. et al. (2013). Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, Future Generation Computer Systems 29(7), 1645-1660.
- [10] Rodríguez A. y Figueredo J. (2016). Selección e implementación de un prototipo de estación meteorológica aplicando IoT y herramientas Google. Instituto Antioqueño de Investigación.
- [11] Rodríguez A. et al. (2020). Diseño y desarrollo de un prototipo para la medición de material particulado PM2. 5 utilizando herramientas IoT. Instituto Antioqueño de Investigación.
- [12] Saifuzzaman M. et al. (2017). IoT based street lighting and traffic management system. En 5th IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference.
- [13] Yanglu A. y Khan A. (2019). Internet of Things Based Wireless Garbage Monitoring System. En Third International conference on I-SMAC.
- [14] Hui T. et al. (2017). Major requirements for building smart homes in smart cities based on internet of things technologies. Future Generation Computer Systems 358-369.
- [15] Internet Society. (2015). La internet de las cosas una breve reseña. Recuperado: <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/09/report-InternetOfThings-20160817-es-1.pdf>. 66-70.

- [16] Rodríguez A. y Figueredo J. (2012). Incidencia de la movilidad de las personas en la concentración de material particulado PM2.5 en una zona residencial urbana. Instituto Antioqueño de Investigación.
- [17] Sarah A. et al. (2020). Learning IoT: Basic Experiments of Home Automation using ESP8266, Arduino and XBee. En IEEE International Conference on Smart Internet of Things.
- [18] Arduino. (2020). Arduino Nano Recuperado: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano?selectedStore=us>
- [19] AVIA Semiconductor. (2016). Sparkfun. Sparkfun Datasheets.
- [20] Suryana A. et al. (2019). Rice controller using half bridge load cell and NodeMCU ESP8266 In Rice Dispenser. En 5th International Conference on Computing Engineering and Design.
- [21] Sparkfun. (2021). Sparkfun Start Something. Recuperado: <https://www.sparkfun.com/products/17146>
- [22] Bogde. (2021). Bogde/HX711 - Github, Recuperado: <https://github.com/bogde/HX711>
- [23] Rasheedha A. (2020). Arduino based automated dosage prescriptor using load cell. En International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology.
- [24] Mustafa M. y Azir K. (2017). Smart bin: Internet-of-things garbage monitoring system. Web of Conferences140(2), 10-15.
- [25] Marques G. et al. (2018). A system based on the internet of things for real-time particle monitoring in buildings. A system based on the internet of things for real-time particle monitoring in buildings 4(2), 15-19.

Diseño de electrodos flexibles y biocompatibles para recuperación de la función motora posterior a lesión medular

Leydy Vanessa Rodríguez Robles¹

Juan David Gómez Villa²

Efraín José Zapata Rey³

Beynor Antonio Páez Sierra⁴

Diana Maritza Marulanda Cardona⁵

Angélica María Ramírez Martínez⁶

Universidad Militar Nueva Granada
Colombia

La parálisis de miembros inferiores causada por una lesión medular es una de las afecciones más discapacitantes a nivel mundial y, a pesar de los avances tecnológicos, no se ha logrado una solución para los afectados. Por lo tanto, el objetivo del presente capítulo es realizar el diseño de una matriz de electrodos para estimulación medular, que tenga el tamaño adecuado para reclutar las fibras nerviosas necesarias y recrear el patrón de la marcha humana. Este diseño se construye en el software SolidWorks y se evalúa mediante una matriz comparativa obteniendo cómo resultado un diseño capaz de lograr los movimientos mínimos de la marcha, teniendo en cuenta técnicas de fabricación de fácil acceso y bajo costo.

¹ Ingeniera Biomédica.

Contacto: *est.leydy.rodriguez@unimilitar.edu.co*

² Ingeniero Biomédico.

Contacto: *est.juan.gomez35@unimilitar.edu.co*

³ Ingeniero Biomédico.

Contacto: *est.efrain.zapata@unimilitar.edu.co*

⁴ Doctor en Ciencias Naturales.

Contacto: *beynor.paez@unimilitar.edu.co*

⁵ Doctora en Ingeniería.

Contacto: *diana.marulanda@unimilitar.edu.co*

⁶ Contacto: *angelica.ramirez@unimilitar.edu.co*

1. INTRODUCCIÓN

La lesión medular LM es un daño en la médula espinal de etiología variable, en donde se interrumpe la comunicación dentro del sistema nervioso provocando la pérdida temporal o permanente de diferentes funciones neurológicas esenciales como la función motora, sensitiva o autonómica, haciéndola de esta manera una de las afecciones más graves y altamente discapacitantes [1]. En su mayoría, estas lesiones se deben a causas prevenibles como accidentes o actos de violencia.

Según la Organización Mundial de la Salud OMS en promedio, a nivel mundial entre 250.000 y 500.000 personas sufren anualmente lesiones medulares, es decir entre 40 y 80 casos por cada millón de habitantes [2]. A nivel Colombia no se cuenta con reportes epidemiológicos sobre lesión medular. Sin embargo, Moreno. S afirma que la lesión medular se presenta en 1 de cada 40 pacientes colombianos que ingresan a un hospital general consultando por trauma [3]. Adicionalmente, [4] determinó en un estudio de cuatro años, que la incidencia de lesiones medulares traumáticas en Colombia es de 56,27 por cada millón de habitantes.

Con base en esto, durante muchos años, los déficits locomotores y la parálisis completa de miembros inferiores causadas por LM han sido motivo de diferentes estudios, no solo para su tratamiento sino también para su posible cura. Dentro de las investigaciones realizadas se han lanzado diferentes posibles soluciones como ayudas técnicas, tratamiento con células madre, exoesqueletos y estimulación medular [5, 6]. Así mismo, dentro de estas investigaciones se ha demostrado que aquellas terapias con dispositivos o ayudas que permiten la producción voluntaria de movimientos activos promueven la neuro plasticidad tanto del cerebro como de la médula espinal permitiendo de esta manera aumentar las probabilidades de recuperar las funciones afectadas por la lesión [7].

Dentro de estas propuestas la más relevante en los últimos 10 años ha sido la estimulación eléctrica medular EEM, ya que esta ha demostrado tener los mejores resultados al promover la creación de nuevas raíces nerviosas, haciendo más viable la recuperación de la función de la marcha sin necesidad de tener el estímulo activado y así dotando de autonomía a la persona afectada.

La estimulación eléctrica medular o también llamada neuro modulación espinal, es la aplicación de corriente eléctrica continua a frecuencias e intensidades variables en lugares específicos de la médula que controlan los movimientos de caderas, rodillas, tobillos y dedos de los pies [8]. Estos impulsos eléctricos son proporcionados a través de un electrodo que puede contener entre 2 a 32 contactos que van dirigidos a los diferentes nervios encargados de generar la marcha humana. Así mismo, estos electrodos pueden ser fabricados de diferentes maneras, que pueden variar desde los materiales y técnicas usados para su fabricación, hasta funcionalidades adicionales como la entrega controlada de medicamentos [9].

Al hacer referencia a electrodos para estimulación medular, es necesario considerar más de 50 años de estudios, que si bien es cierto empezaron como un intento para disminuir el dolor crónico en pacientes, años más tarde se convertiría en la base para recuperar la marcha en personas con LM. Estos electrodos tuvieron sus primeros inicios en base a la Teoría de la compuerta, donde se afirma que los estímulos no dolorosos pueden son capaces de bloquear al estímulo doloroso evitando que la sensación de dolor viaje al sistema nervioso central, esto debido a que la sensación dolorosa se explica por la intensidad del estímulo y no por la calidad de este [10], por lo que la estimulación no nociva se convierte en el primer camino para suprimir el dolor.

Posteriormente, se desarrolló el primer modelo para estimulación medular compuesto por dos diseños de electrodos principales fabricados a base de una aleación de platino, cables percutáneos y una matriz de electrodos. Tras varios estudios se determinó que la paleta de electrodos a pesar de ser una solución más invasiva es la que proporciona mejores resultados en cuanto a una estimulación dirigida a fibras nerviosas específicas [11].

En base a estos estudios se desarrollaron diversas investigaciones respecto al diseño de electrodos para LM como [12], quien diseñó dos microelectrodos flexibles basado en las propiedades que otorga la poliamida.

En el primer caso, desarrolló un electrodo a base de cromo y plata como sustrato, titanio y platino como capa de adhesión y una poliamida fotosensible (PI-2732 Dupont) como capa de soporte; mediante procesos como *lie off* y curación bajo atmósfera de nitrógeno. Para el segundo caso, se mantuvieron los mismos metales del caso anterior. No obstante, se reemplazó la poliamida por una no fotosensible (PI-261132 Dupont) y se hizo uso del grabado seco en un sistema ICP junto con la curación bajo atmósfera de nitrógeno. Posteriormente los electrodos fueron caracterizados mediante espectroscopia de impedancia.

Como resultado de la investigación se encontró que ambos electrodos demuestran excelentes propiedades de flexibilidad, biocompatibilidad, estabilidad térmica, dureza, resistencia dieléctrica y amortiguación mecánica tanto en la implantación como en la manipulación gracias a la poliamida. Así mismo, exponen que, al hacer uso de una poliamida no fotosensible, es posible encontrar diferentes alternativas para su manipulación y grabado de patrones en comparación a una poliamida fotosensible.

Por la misma línea, en el estudio [13] se fabricó una matriz de electrodos flexible teniendo como sustrato el PET/ITO, y se usó una foto máscara SU-8 como patrón geométrico. Los procesos de fabricación fueron litografía óptica, *spin coating* y grabado húmedo. En esta investigación se destaca el uso del ITO para la fabricación de electrodos para LM ya que representa ventajas significativas al poseer una buena biocompatibilidad, alta fuerza dieléctrica, estabilidad mecánica y flexibilidad. Sin embargo, al poseer una alta impedancia que podría afectar los tejidos humanos, es necesario recubrir la capa de ITO con un metal biocompatible como el oro. Así mismo, se encontró que la matriz de electrodos mostró resistencia a los solventes, además de conservar su forma y propiedades originales después de realizar pruebas mecánicas.

Mediante el abordaje de estas técnicas, el estudio de diferentes materiales y avances tecnológicos, de manera paralela se empezaron a desarrollar electrodos flexibles a base de Parileno como lo expone [14] al fabricar una matriz de electrodos circulares, basada en la estructura sándwich de Parileno-platino-Parileno mediante litografía.

En este estudio se determinó que, si bien es cierto que la matriz de electrodos logra una buena estimulación a bajas frecuencias, a la hora de trabajar con Parileno y platino es de vital importancia la deposición de una capa de titanio antes de depositar el platino con el fin de evitar la delaminación que es uno de los problemas más comunes al fabricar electrodos.

Adicionalmente, el trabajo expuesto anteriormente en conjunto con nuevas técnicas de fabricación de electrodos para médula espinal trajo consigo desarrollos como el propuesto por [15], quien se enfocó en la fabricación de electrodos flexibles, sus posteriores efectos en ratas con lesión medular y mejoras respecto a los electrodos rígidos existentes en el mercado. Esto mediante el uso de silicona transparente como sustrato, interconexiones de oro elástico para los electrodos, aleación de platino y silicona para recubrir el electrodo y un micro canal fluídico flexible para la administración controlada de fármacos; esto gracias a diferentes procesos como litografía blanda, activación con plasma de oxígeno y serigrafía.

Como resultado principal de la investigación, se determinó que la aleación de platino y silicona confiere una elasticidad excepcional a todo el implante lo que permitió no solo una mejor integración y ajuste delicado al espacio subdural a lo largo de la extensión del segmento lumbosacro, sino también demostró tener una mejor adaptabilidad y no deterioro de la marcha a lo largo de las diferentes pruebas realizadas en comparación con electrodos rígidos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente artículo tiene como finalidad mostrar el proceso de diseño de un electrodo para lesión medular en base a estudios científicos, procesos de fabricación y anatomía de médula espinal y tren inferior.

2. MÉTODO

La metodología que se sigue en este trabajo se compone de tres etapas: la primera de ellas se relaciona con la determinación de los principales puntos anatómicos, la segunda se asocia con la definición de técnicas para fabricación del electrodo y la tercera corresponde al diseño computacional.

2.1 Etapa de determinación de puntos anatómicos

El electrodo tiene como función principal suplir la conexión perdida entre el cerebro y los diferentes nervios necesarios para la marcha humana mediante el reclutamiento secuencial de las diferentes raíces componentes de los nervios espinales, esto mediante un contacto directo con la médula espinal a través de la duramadre. Si bien es cierto que el electrodo está enfocado en médula espinal, es importante tener en cuenta algunas de las estructuras que la componen, rodean y brindan apoyo a su correcto funcionamiento como la columna vertebral, nervios espinales y músculos encargados de la marcha humana.

2.1.1 Medula espinal

Como se mencionó anteriormente, el electrodo estaría situado en la médula espinal ya que esta es el centro principal de los movimientos reflejos y funciona como la vía de comunicación del encéfalo con los órganos sensoriales y motores del cuerpo humano. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la médula espinal al igual que el encéfalo se encuentra protegida por diferentes capas como la piamadre, aracnoides, y duramadre; siendo esta última en donde realmente se situaría el electrodo.

Ahora bien, la medula espinal es un cordón de tejido nervioso con aspecto cilíndrico situado al interior de la columna vertebral con una longitud media de 40-50cm y diámetro aproximado de 1-2cm, que puede variar dependiendo del sexo de la persona [16]. Así mismo, está compuesta por nervios y raíces espinales de calibre aproximado de 0.5mm, en donde cada nervio está conformado por dos grupos de raíces espinales denominadas anteriores y posteriores, es decir, las raíces motoras emergentes de la médula espinal y las raíces sensitivas aferentes. Esto se puede observar en la Figura 1.

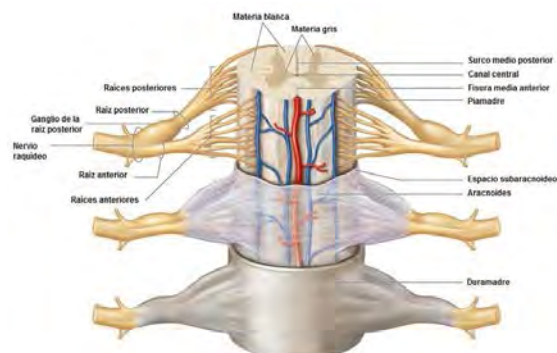


Figura 1. Revestimiento meníngeo de la médula espinal junto con los nervios espinales [17]

Cada par de nervios espinales se designan y nombran según la región y nivel donde emergen de la columna vertebral. Esto se puede apreciar en la Figura 2.

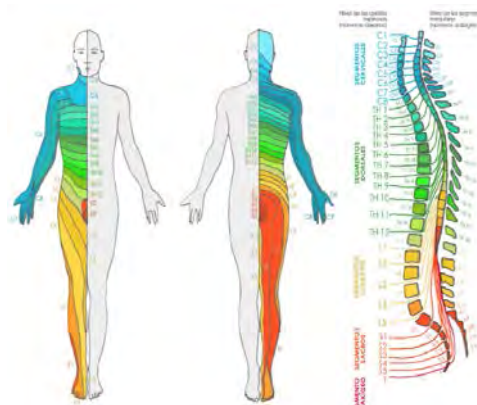


Figura 2. Inervación de los nervios de los nervios espinales [18]

Para el desarrollo del proyecto se define como región primordial de estudio aquella comprendida entre T12 y L1, región anterior al comienzo de la cauda equina y conglomerado de nervios espinales comprendidos

de L1-S2. En la Tabla 1 se detalla las principales medidas de la médula espinal que se deben tener en cuenta para el diseño del electrodo.

Tabla 1. Medidas médula espinal

Zona anatómica medula espinal	Medida (cm)
Longitud	45
Diámetro	1-1,5
Perímetro (para un diámetro de 1.5cm)	4,71
Perímetro implantación electrodo	2,355

Adicionalmente en estudios realizados durante los últimos años para la construcción de electrodos en médula espinal [7, 19, 20], se han elaborado escaneos 3D y modelos computacionales de la médula, que permite tener una mayor precisión en cuanto a las medidas aproximadas entre nervios espinales.

2.1.2 Columna vertebral

Al hacer referencia a la columna vertebral, se tiene en cuenta que esta es la estructura encargada no solo de proporcionar soporte estructural al tronco junto con la flexión y extensión de la espina dorsal, sino que también es la encargada de rodear y proteger la médula espinal, proporcionar puntos de unión para los músculos de la espalda y costillas. Así mismo, está dividida en diferentes secciones, compuesta por los diferentes tipos de vértebras junto con sus respectivos discos intervertebrales que permiten la articulación delantera de las mismas [21]. Esto se puede apreciar en la Figura 3.

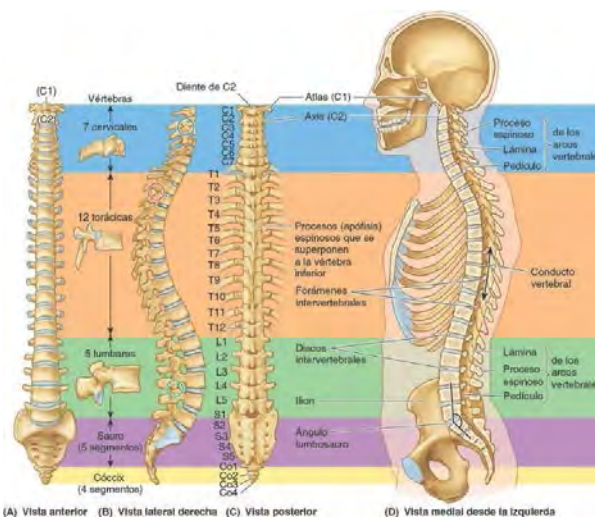


Figura 3. La imagen de la composición de la columna vertebral está dividida en sus cinco regiones principales junto con sus características y composiciones principales [22]

La columna vertebral cuenta con una estructura conocida como agujero vertebral o raquídeo como resultado de la unión continua de las vértebras, conducto por el cual pasa la médula espinal (Figura 4.a). Adicionalmente la columna cuenta con los agujeros de conjunción por donde los nervios raquídeos salen a los diferentes sistemas del cuerpo humano (Figura 4.b) [23].

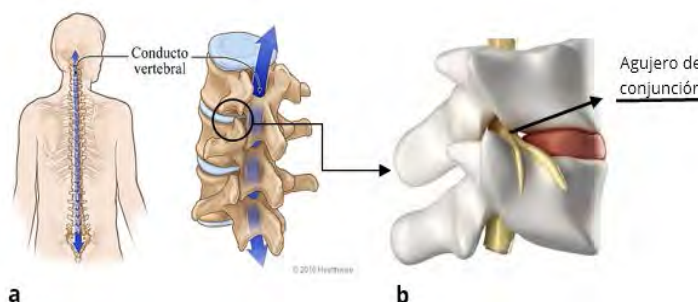


Figura 4. Anatomía columna vertebral: a) Conducto vertebral [24], b) Agujeros de conjunción

La columna vertebral juega un factor crucial para el diseño del electrodo ya que a través de esta es por donde ingresará a la médula espinal, por tanto, el diseño del electrodo tiene que cumplir con una geometría específica con el fin de no lastimar ninguna estructura y que sea fácilmente manipulable. En base a esto, el diseño se basa en diferentes estudios [25–27] que indican que el mejor diseño se fundamenta en una geometría en forma de paleta que contenga varios contactos (electrodos), esto para obtener una mayor flexibilidad en los patrones de estimulación, evitar el desplazamiento del electrodo a lo largo de la médula dorsal, mantener un flujo de corriente (mejor campo eléctrico) y evitar la estimulación dorsal.

2.1.3 Músculos encargados de la marcha humana

La marcha humana se compone de dos fases principales denominadas fase de apoyo y fase de oscilación. Durante estas fases se deben cumplir cuatro criterios principales: Aceptación del peso en pierna derecha + balanceo en pierna izquierda, propulsión pierna derecha, balanceo pierna derecha + aceptación del peso en pierna izquierda y propulsión de pierna izquierda [7].

Entre los músculos involucrados en la marcha según la región anatómica definida anteriormente podemos encontrar el iliopsoas, vasto lateral, recto femoral, tibial anterior, semitendinoso, gastrocnemio, extensor largo común de los dedos, soleos, bíceps femoral y glúteo mayor. En la Figura 5 se puede ver la relación del nervio espinal según el músculo.



Figura 5. Relación entre nervios espinales y músculos para estimulación

En la Tabla 2 se detalla la relación existente entre los criterios de las fases de la marcha y los músculos necesarios para la generación de este.

Tabla 2. Relación entre músculos y movimiento

Criterio de evaluación	Músculos involucrados
Aceptación del peso	Vasto lateral y recto femoral
Propulsión	Semitendinoso y soleos.
Balanceo	Iliopsoas, recto femoral y tibial anterior

A partir de esto, se define que por pierna es necesario la activación de mínimo 7 nervios espinales para poder lograr la marcha, es decir idealmente la paleta o matriz a realizar debe contener al menos 14 electrodos. Sin embargo, la construcción de una matriz que contenga 8 electrodos también puede ser capaz de lograr 4 movimientos mínimos para la marcha humana que implican flexión de cadera, extensión de rodilla, flexión y extensión del tobillo [7].

2.2 Etapa de definición de técnicas para la fabricación de electrodos

Aunque la finalidad de este estudio no radica en la fabricación del electrodo, para el diseño resulta de suma importancia definir algunas técnicas ya que a partir de estas es posible definir los tamaños mínimos tanto para los electrodos y canales. Siguiendo con las ideas propuesta en [12,13] se plantea el diseño de un electrodo de PET/ITO con grabado de patrón mediante ataque químico, en donde se realiza la inmersión completa de la muestra preparada en un fluido de ataque para lograr una corrosión controlada de partes específicas de la muestra, esto dependiendo de la temperatura, tiempo y efecto deseado [28]. Esta técnica permite lograr caminos en un rango entre 0.5-1mm. Sin embargo, la técnica resulta ser más efectiva si los caminos se mantienen en un límite de 1mm. Con base a lo expuesto se propone el diseño del electrodo con las medidas que se registran en la Tabla 3.

Tabla 3. Medidas electrodo para médula espinal

Zona anatómica medula espinal	Medida (mm)
Ancho total de la matriz	15
Largo total de la matriz	60
Ancho de canales	0,7-1
Largo de electrodo (contacto)	4
Ancho del electrodo (contacto)	2
Espacio vertical entre contactos	1,2
Espacio horizontal entre contactos	4,5

2.3 Etapa de diseño computacional

Se diseñan 3 tipos de paletas de electrodos teniendo en cuenta que el tamaño estándar establecido para todos es de 2x6cm, estos se diseñan a través de la variación de parámetros como cantidad de electrodos, músculos a estimular, tamaño de canales y espacio para la sujeción de un estimulador. A continuación, se describen los diferentes diseños implementados en el software Solidworks.

2.3.1 Paleta de ocho electros

Este diseño consta de los contactos necesarios para realizar los movimientos básicos anteriormente establecidos durante la marcha. En cuanto al diseño de los electrodos se determinó un tamaño de 0.2X0.5 mm y para los canales, necesarios para llevar el impulso eléctrico a los electrodos, 1 mm de ancho con distancia de separación de 1mm entre cada uno. Finalmente se realizó un redondeo en las esquinas superiores de 6mm.

2.3.2 Paleta de diez electrodos

Según los estudios realizados en [7] se determinan diez contactos principales para lograr la flexión de cadera, extensión de rodilla, flexión y extensión del tobillo, al igual que el diseño anterior. No obstante, en algunos movimientos resulta necesario realizar la activación de más de un electrodo por lo que es necesario agregar dos electrodos de soporte adicional. En este caso, el tamaño de los electrodos se estableció en 4 X 2mm y el ancho y separación de los canales en 0,7mm. En comparación al diseño de ocho electrodos no se implementó ningún redondeo en el diseño.

2.3.3 Paleta de dieciséis electrodos

Para el diseño del electrodo de 16 canales se tomaron en cuenta todos los músculos establecidos anteriormente. Para este caso se adoptaron las mismas medidas y redondeo de los electrodos del primer diseño. Sin embargo, para el diseño de los canales fue necesario tomar la precisión mínima que permite la técnica de ataque químico (0,5mm).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Figura 6 se muestran los diseños obtenidos anteriormente en la etapa de diseño computacional.

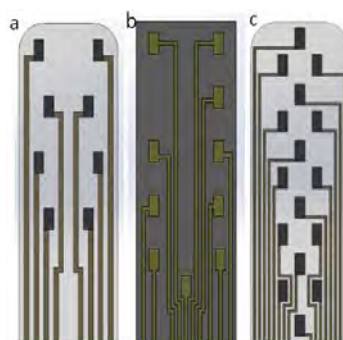


Figura 6. Diseños de matriz de electrodos obtenida: a) con 8 electrodos, b) con 10 electrodos, c) con 16 electrodos

Con el propósito de poder comparar los diseños entre sí y definir el mejor se realiza matriz de comparación como se observa en la Tabla 4. En esta se toman diferentes parámetros importantes para el diseño del electrodo en base a la literatura para su construcción y relación anatómica y se establece una calificación del 0 a 5, siendo 0 un parámetro que no se tiene en el diseño o no cumple con lo establecido y 5 un parámetro en donde cumple a la perfección con lo establecido.

Tabla 4. Medidas electrodo para médula espinal

Parámetro / Diseño electrodo	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Número de electrodos	2	3	5
Ancho de canales	5	4	5
Espacio entre canales	5	4	1
Contacto con zonas anatómicas definidas	3	5	4
Espacios laterales en la matriz	4	2	2
Espacio superior en la matriz	5	5	3
Distancia horizontal entre electrodos	3	3	3
Optimización en el diseño	4	4	5
Viabilidad según técnica de fabricación definida	5	3	1
Total	36	33	29

Se puede observar que el Diseño 1 resulta ser el más viable para la construcción, cumpliendo con lo establecido en teoría y literatura. No obstante, el Diseño 2 es un modelo realizable, ya que, si bien es cierto que su geometría cuenta con un ancho de canales menor a lo recomendado para la aplicación de la técnica, aun así, cuenta con la ventaja de tener un mayor número de electrodos para lograr una estimulación más precisa a cada nervio para lograr la marcha.

Finalmente, el tercer diseño a pesar de tener un mayor número de electrodos que pueden mejorar de manera significativa la marcha con respecto al diseño uno (1) y dos (2), cuenta con parámetros que pueden afectar la fabricación y posterior uso del diseño. Por un lado, al tener un mayor número de electrodos se reduce el ancho de canales al límite mínimo especificado para la técnica, lo que conlleva a un desgaste temprano de los canales o errores durante la fabricación de este. Adicionalmente al contar con espacio limitado en sus laterales existe la posibilidad de crear estimulación dorsal.

4. CONCLUSIONES

Se propuso el diseño de 3 matrices electrodos diferentes para lograr la estimulación de la médula espinal posterior a una lesión con el fin de recuperar la marcha. Los diferentes diseños cumplen con los parámetros especificados para lograr el reclutamiento de las raíces posteriores de los nervios espinales.

Sin embargo, al hacer énfasis en una técnica de fabricación como el ataque químico la simplificación del diseño juega un rol fundamental. En este caso, los diseños con menos de 14 electrodos resultan favorables para su posterior construcción y pruebas al cumplir con límites óptimos en distancias entre electrodos, canales y límites laterales.

El diseño de la matriz de electrodos subraya la urgencia de desarrollar nuevos métodos para el diseño de electrodos para estimulación medular que puedan aprovechar los parámetros regidos para la estimulación eléctrica medular, además de proporcionar nuevas características que favorezcan a una mejor optimización de recursos y apoyen la neurorrehabilitación.

REFERENCIAS

- [1] aspymmadr.org. (2018). Lesión Medular: Guía para el manejo integral del paciente con LM crónica. Recuperado: www.aspymmadr.org
- [2] OMS. (2013). Lesiones medulares. Organización Mundial de la Salud Recuperado: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>
- [3] Henao C. y Pérez J. (2010). Lesiones medulares y discapacidad: Revisión bibliográfica. Aquichan 10(2).
- [4] Giraldo J. et al. (2021). Epidemiology of traumatic spinal cord injuries in Colombia. Spinal Cord Series and Cases 7(1), 1-8.

- [5] www.mayoclinic.org. (2021). Lesiones de la médula espinal - Síntomas y causas - Mayo Clinic. Recuperado: <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/spinal-cord-injury/symptoms-causes/syc-20377890>
- [6] Coutts M. y Keirstead H. (2020). Stem cells for the treatment of spinal cord injury. *Exp Neurol* 209(2), 368–377.
- [7] Wagner F. et al. (2018). Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *Nature* 563 (7729), 65–93.
- [8] www.consalud.es. (2018). Dispositivo de estimulación epidural para volver a caminar. Recuperado: https://www.consalud.es/saludigital/126/una-novedosa-tecnologia-ayuda-a-las-personas-con-lesion-medular-a-volver-a-caminar_55721_102.html
- [9] North R. (2018). Spinal Cord Stimulation for the Treatment of Low Back Pain. *Neuromodulation* 647–655.
- [10] Gonzales J. et al. (2013). La teoría de la compuerta. Más allá del concepto científico hay dos universos científicos dedicados al entendimiento del dolor. *Dotal* 20(4), 191–202.
- [11] Benzon H. et al. (2018). *Essentials of Pain Medicine*. Elsevier.
- [12] Mertz S. et al. (2000). Fabrication and test of implantable thin-film electrodes for stimulation and recording of biological signals. En 1st Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology.
- [13] Ahani A. et al. (2011). Flexible PET/ITO electrode array for implantable biomedical applications. En *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*.
- [14] Singh M. (2014) *Microelectrode Implants for Spinal Cord Stimulation in Rats*. Disertación doctoral. California Institute of Technology.
- [15] Mineev I. et al. (2015). Biomaterials. Electronic dura mater for long-term multimodal neural interfaces. *Science* 347(6218), 159–163.
- [16] Frostell A. et al. (2016). A review of the segmental diameter of the healthy human spinal. *Cord. front neurol* 7, 238.
- [17] Kenhub. (2021). Médula espinal: Anatomía, estructura, vías y función. Recuperado: <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/medula-espinal-es>
- [18] Gadier L. (2020). Anatomía clínica. Los dermatomas. Recuperado: <https://www.elsevier.com/es-es/connect/medicina/edu-anatomia-clinica-los-dermatomas>
- [19] Capogrosso M. et al. (2016). A brain–spine interface alleviating gait deficits after spinal cord injury in primates. *Nature* 539(7628), 284–288.
- [20] van den Brand R. et al. (2012). Restoring voluntary control of locomotion after paralyzing spinal cord injury. *Science* 336(6085), 1182–1185.
- [21] MedlinePlus. (2022). Columna vertebral. Recuperado: https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/1116.htm
- [22] E.Top Enfermería. (2021). Descripción general del dorso y la columna vertebral. Recuperado: <https://enfermeria.top/apuntes/anatomia/dorso/descripcion-general/>
- [23] Kenhub. (2022). Columna vertebral: Anatomía, vértebras, articulaciones. Recuperado: <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/columna-vertebral>
- [24] Cigna. (2022). Conducto vertebral. Recuperado: <https://www.cigna.com/es-us/knowledge-center/hw/conducto-vertebral-tp12604>
- [25] Benzon H. et al. (2018). *Essentials of Pain Medicine*. Harlton.
- [26] Neupsy Key. (2016). Spinal Cord Stimulation. Recuperado: <https://neupsykey.com/spinal-cord-stimulation-2/>
- [27] Oxford Functional Neurosurgery. (2016). Spinal cord stimulation. Recuperado: <http://www.oxfordfunctionalneurosurgery.org/scs.shtml>
- [28] Facultad de ingeniería industrial. (2011). Metalografía protocolo curso de materiales: Curso de materiales. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Comparación de métodos de filtrado de interferencias de líneas eléctricas en la electromiografía superficial multicanal

Carlos Arturo Carrasco Henao¹
Eduardo Rodríguez Araque²
Fundación Universitaria Cafam
Colombia

La electromiografía superficial multicanal es una técnica relativamente reciente para medir el comportamiento eléctrico de los músculos que, además de la secuencia temporal clásica, proporciona información espacial y bidimensional. La señal registrada por la medición es la suma de las señales de interés, la interferencia de la línea eléctrica y otras. En este estudio preliminar se comparan dos métodos de filtrado para la interferencia de líneas eléctricas: análisis de componentes canónicos y un filtro RLS robusto. Las señales se obtuvieron de siete personas sanas y la matriz de datos resultante se procesó comparando las señales con la relación de ruido calculada como parámetro de evaluación. Posteriormente, en una prueba de hipótesis sobre los valores medios, los métodos de filtrado presentaron diferencias significativas. Como conclusión preliminar, se encontró estos métodos tienen el mismo desempeño en el propósito de eliminar el ruido, sin embargo, otros resultados recogidos sugieren que algunos elementos del proceso deberían ser refinados y que aspectos como la complejidad de los algoritmos de implementación deberían ser corroborados. De acuerdo con las referencias no se encontraron investigaciones sobre las comparaciones de estos dos métodos en el caso de la electromiografía de superficie de alta densidad.

¹Ingeniero Electrónico, Especialista en Automatización de Procesos Industriales y Magíster en Ingeniería Electrónica.
Contacto: carlos.carrasco@unicafam.edu.co

²Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería Electrónica y de Computadores, y Doctor en Ingeniería.
Contacto: eduardo.rodriqueza@unicafam.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La electromiografía superficial multicanal o de alta densidad HD-SEMG es una técnica no invasiva para capturar, registrar y procesar señales bioeléctricas de los músculos humanos [1, 2]. La ubicación de los sensores dispuestos en una matriz bidimensional brinda información no solo temporal sino también espacial y topográfica del grupo muscular en el cual se realice la medición. La Figura 1 muestra el modelo de la fibra muscular, la zona de inervación, la dirección de disipación del potencial de acción (biopotencial), la ubicación de los amplificadores electrónicos y las señales obtenidas en la zona de inervación y zonas de disipación, y la forma característica típica obtenida de la señal electromiográfica y una representación de la fibra muscular.

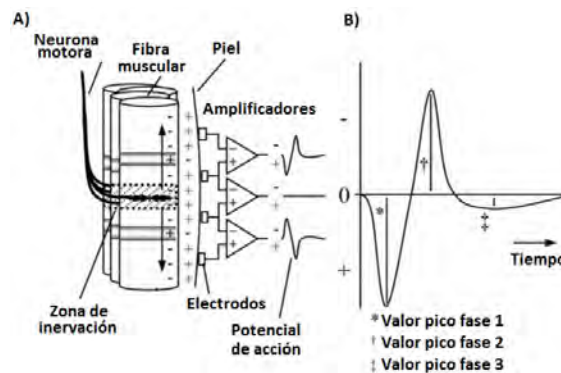


Figura 1. Modelo de: a) ubicación de sensores de biopotencial y b) forma de señal característica [10]

A partir de la HD-SEMG es posible obtener información sobre la velocidad de conducción y propagación de la señal bioeléctrica para el estudio de fenómenos como la fatiga muscular [1, 3]; la ubicación precisa del punto de inervación del músculo utilizado para la inyección, por ejemplo, de un fármaco [1, 3, 4]; en el entrenamiento deportivo como el levantamiento de pesas [5]; esta técnica también es útil para identificar y describir las contracciones isométricas e isotónicas en movimientos de grupos musculares específicos para mejorar los patrones de rehabilitación [6], entre otras aplicaciones.

La identificación de la señal electromiográfica a menudo se ve atenuada, distorsionada o afectada por causas como el acoplamiento de impedancia entre la piel, el electrodo y el cableado eléctrico, el movimiento de artefactos, el ruido electromagnético, el ruido gaussiano y la interferencia de la línea eléctrica PLI [7, 8]. La PLI puede interferir significativamente con la relación señal-ruido SNR, ya que el cuerpo humano actúa como una antena para las radiaciones eléctrica y magnética, donde la señal contaminante puede reflejarse en valores de biopotencial hasta tres veces mayor a la señal de interés. El ruido dominante en esta categoría tiene frecuencias de 50 o 60 [Hz] y, a veces, es capturado por diferencias en las impedancias de los electrodos o corrientes de Foucault entre el sujeto de prueba y el cableado. Sin embargo, a pesar de las precauciones tomadas durante el registro de señales, estas interferencias suelen aparecer en los espectrogramas de las señales.

Este artículo tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos de la comparación de dos métodos de filtrado de la PLI que demostraron ser eficientes para disminuir o eliminarla, los métodos son, el Análisis de Correlación Canónica ACC [7], y un filtro robusto recursivo de mínimos cuadrados RRLS [9]. Estos métodos se aplicaron a las señales obtenidas en el músculo tibial anterior al ejecutar una Máxima Contracción Voluntaria MCV en siete sujetos de prueba. Se calculó la SNR a las señales previas y posteriores al filtrado y se aplicó un análisis estadístico para determinar la efectividad de los filtros implementados.

2.1 Filtro ACC

El ACC correlaciona dos variables multidimensionales [11]. Se basa en la extracción de relaciones lineales entre sí y transformaciones lineales. En una matriz de sensores que adquieren señales simultáneamente, cada señal es una suma lineal que incluye la señal en consideración, la influencia de las señales circundantes y el ruido [7, 12]. Si X representa la matriz $m \times n$ de los datos capturados, y S es la matriz $m \times n$ de la señal de interés, X se define en la ecuación (1).

$$X = AS \quad (1)$$

Donde A es una matriz de mezcla. El objetivo del método es estimar los datos de la señal de interés, estimando la matriz A introduciendo una matriz cuadrada de extracción W en la ecuación (2).

$$Z = WX \quad (2)$$

Donde Z es una matriz que tiende a S con un factor de escalamiento. Presentando una versión atrasada X llamada Y, como en la ecuación (3).

$$Y(l) = X(l - 1) \quad (3)$$

Donde l representa el número de la muestra. Dado que X es una combinación de componentes, la contribución ponderada de cada componente se puede expresar con la ecuación (4).

$$w_{x1}x_1 + w_{x2}x_2 + \dots + w_{xn}x_n = w_x^T X \quad (4)$$

Similarmente, para Y en la ecuación (5).

$$w_{y1}y_1 + w_{y2}y_2 + \dots + w_{yn}y_n = w_y^T Y \quad (5)$$

Definiendo $u = w_x^T X$ y $v = w_y^T Y$, siendo w_x^T and w_y^T los vectores de ponderación. El ACC encuentra esos vectores de tal forma que la correlación ρ , para variables con media cero, se maximice con la ecuación (6).

$$\begin{aligned} \max_{w_x, w_y} \rho(u, v) &= \frac{E[u, v]}{\sqrt{E[u^2]E[v^2]}} \\ &= \frac{E(w_x^T X w_y^T Y)}{\sqrt{E[w_x^T X w_x^T X]E[w_y^T Y w_y^T Y]}} = \frac{w_x^T C_{xy} w_y}{\sqrt{(w_x^T C_{xx} w_x)(w_y^T C_{yy} w_y)}} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde C_{xx} y C_{yy} son las auto covarianzas de X y Y respectivamente, y C_{xy} la covarianza entre X y Y. La maximización se logra resolviendo las derivadas parciales de w_x y w_y igualándolas a cero. La expresión resultante se muestra en la ecuación (7) [12].

$$\begin{cases} C_{xx}^{-1} C_{xy} C_{yy}^{-1} C_{yx} \hat{w}_x = \rho^2 \hat{w}_x \\ C_{yy}^{-1} C_{yx} C_{xx}^{-1} C_{xy} \hat{w}_y = \rho^2 \hat{w}_y \end{cases} \quad (6)$$

Donde ρ es el coeficiente de correlación canónica (raíz cuadrada del valor propio), w_x y w_y los vectores propios. En el cálculo anterior se obtienen variantes de las componentes lineales y se ordenan por su correlación. El primer par de vectores u y v (primera variante) contiene la correlación más alta. Entonces el segundo par también está correlacionado, aunque no está asociado con el primer par, y así sucesivamente. Los componentes menos correlacionados corresponden a los componentes de ruido, que puedan eliminarse de la matriz original. Una vez eliminadas las variantes canónicas asociadas al ruido, se obtiene la matriz Z, como se observa en la ecuación (8).

$$S = W^{-1}Z \quad (7)$$

En el experimento de MVC, el proceso de eliminación de ruido consiste en calcular la relación de intensidad, r_j , para cada componente que se encuentra en el ACC, según la ecuación (9)

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^N |S_j(i)|}{N} \times \frac{P}{\sum_{i=1}^P |b_j(i)|} \quad (8)$$

Definiendo $S_j(i)$ como la muestra i -ésima del componente j -ésimo estimado, y $b_j(i)$ como la muestra i -ésima del elemento j -ésimo, medido durante un tiempo de reposo inicial del experimento. N es el número total de muestras de la señal registrada y P es el número total de muestras de este tiempo.

2.2 Filtro RRLS

La señal bioeléctrica proveniente de la electromiografía se puede representar como en la ecuación (10).

$$x(n) = s(n) + p(n) \quad (9)$$

Donde $x(n)$ es la señal medida, $p(n)$ es la señal de la PLI y $s(n)$ es la señal de interés más la señal de otros ruidos eléctricos. La PLI es un conjunto de componentes armónicos sinusoidales representados en la ecuación (11).

$$p(n) = \sum_{k=1}^M a_k \cos(k\omega_f n + \varphi_k) \quad (10)$$

Donde ω_f es la frecuencia fundamental en $[rad/s]$, a_k , y φ_k son la amplitud y la fase del k -ésimo armónico, respectivamente, y M es el número de armónicos presente la PLI.

El algoritmo contempla cuatro fases [9]: la ubicación de una banda de frecuencias donde se estima que se encuentra la frecuencia fundamental de la PLI; el cálculo de la frecuencia fundamental de la PLI; la estimación de las frecuencias armónicas; y el cálculo de la amplitud y fase.

En la primera fase, es necesario localizar la banda de frecuencia fundamental para su posterior estimación. A veces, los componentes armónicos en el espectro de frecuencia pueden ser más importantes que la frecuencia fundamental; se utiliza un filtro de impulsos infinitos de cuarto orden (IIR) en la banda de 40 a 70 [Hz] para lograr la delimitación. Este filtro atenúa tanto las bajas frecuencias que incluyen movimientos involuntarios, como las altas frecuencias que contienen los armónicos, considerando las frecuencias fundamentales de 50 o 60 [Hz]. Se agrega un diferenciador de primer orden para reducir el sesgo de la estimación obtenida, y con esto, la señal filtrada tendrá la forma de la ecuación (12).

$$x_d(n) = H(x(n)) - H(x(n-1)) \quad (11)$$

Donde $H(x(n))$ es la realización del filtro. En la Figura 2 se muestra la Densidad Espectral de Potencia PSD para las señales original y filtrada.

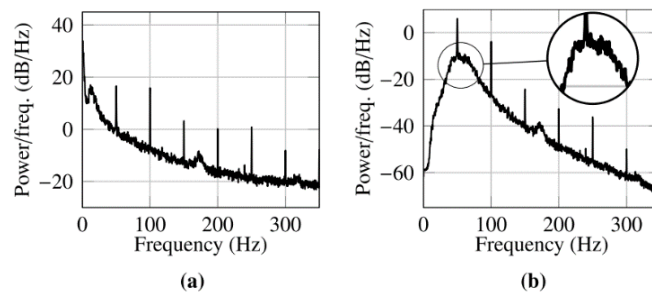


Figura 2. a) PSD de la señal original, y b) PSD después del filtro pasabanda y el filtro diferencial [1]

Para la estimación de la frecuencia fundamental se utiliza un Filtro Notch Adaptativo ANF. La Figura 3 muestra la estructura del filtro, k_f es el coseno del ángulo de la frecuencia fundamental, α_f es el ancho de banda del filtro Notch, que también controla la tasa de estimación de la frecuencia, y toma valores 0 y 1.

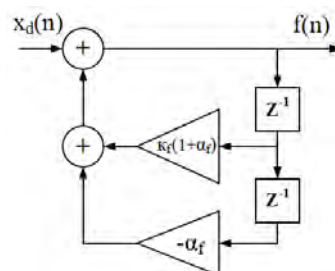


Figura 3. Estructura del estimador de la frecuencia fundamental de la interferencia [1]

Los osciladores de tiempo discreto generan frecuencias armónicas. Esta estructura proporciona salidas sinusoidales ortogonales: $u_k(n)$ y $u'_k(n)$, que se utilizan en la siguiente etapa (estimación de fase y amplitud de armónicos). La frecuencia armónica se controla para evitar cálculos trigonométricos adicionales con la variable k_f en la ecuación (13).

$$K_k = 2k_f k_{k-1} - k_{k-2} \quad (12)$$

Donde $k = 2, 3, \dots, M$. Las salidas del oscilador son expresadas con las ecuaciones (14 y 15).

$$u_k(n) = v_k \sin(k\hat{\omega}_f n + \psi_k) \quad (13)$$

$$u'_k(n) = v'_k \cos(k\hat{\omega}_f n + \psi_k) \quad (14)$$

Las amplitudes y fases de los componentes armónicos no son las mismas que la amplitud y fase fundamental (a_k y φ_k). Por lo tanto, es necesario un paso adicional para su estimación. El k -ésimo armónico $\hat{h}_k(n)$ se calcula con la ecuación (16).

$$\hat{h}_k(n) = b'_k u_k(n) + c'_k u'_k(n) \quad (15)$$

Donde:

$$b'_k = a_k \cos \varphi_k / v_k \quad (16)$$

$$c'_k = a_k \sin \varphi_k / v'_k \quad (17)$$

Para el cálculo de estas dos constantes se utiliza el algoritmo Recursive Least Squares RLS, que busca minimizar el error entre la estimación $\hat{h}_k(n)$ and $x(n)$.

2. MÉTODO

Se seleccionaron siete sujetos sanos sin antecedentes de neuropatía, con una edad promedio de 51 años (mín: 32 años; máx: 67 años), peso promedio de 74,3 [kg] (mín: 65,3 [kg]; max: 87.6 [kg]), altura promedio de 1,63 [m] (min: 1,54 [m]; max: 1,7 [m]), y con un índice de masa corporal promedio calculado de 27,85 [kg/m²] (min: 23,99 [kg/m²]; máx.: 32,02 [kg/m²]). Se aplicó un protocolo para el desarrollo experimental y captura de datos, que incluye el consentimiento por escrito de los sujetos previamente aprobado por el comité de ética de la institución [13].

Para la captura y registro de las señales se utilizaron los siguientes componentes: un arreglo de 64 sensores de electrodos Ag/AgCl (Otbioelettronica, ref.: ELSCH064RS3) cuyo material de construcción ha demostrado ser de impedancia constante y estable a las fluctuaciones de corriente [14], esta matriz tiene una distancia entre electrodos de 8 [mm]; 4 preamplificadores de ganancia cinco empaquetados en grupos de 16 canales (Otbioelettronica, ref.: AD1x16SD5) como se muestra en la Figura 4 (con la configuración de polaridad mostrada se registraron 55 señales diferenciales).

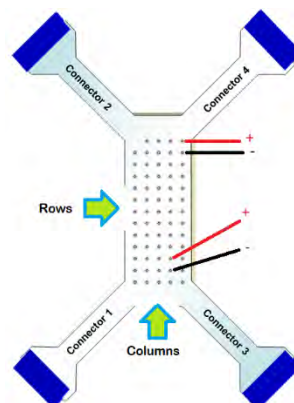


Figura 4. Arreglo de sensores. Adaptado del manual técnico

Finalmente, un instrumento de adquisición multicanal (Otbioelettronica, ref.: EMG-USB2) configurado en resolución de 12 bits, con un software (Otblab®) configurado para obtener una ganancia total de 1000x (considerando la ganancia de los preamplificadores), una frecuencia de muestreo de 2048 [muestras/segundo], un filtro paso alto con frecuencia de corte a 3 [Hz] y un filtro paso bajo con frecuencia de corte a 500 [Hz].

Se tomaron medidas en el músculo tibial anterior del miembro derecho, ubicando el centro de la matriz en el punto de inervación teórica, como se muestra en la Figura 5, cada experimento consta de 10 segundos de descanso para tomar una línea de base, 10 segundos de la MCV isométrica, y 10 segundos de recuperación. Para la evaluación, los primeros 10 segundos se toman como línea de base y la MCV.



Figura 5. Localización de instrumentación en el músculo tibial anterior [13]

Para el análisis postproceso de los datos se desarrolló una aplicación en MATLAB®, tomando como base para el filtro RRLS, el propuesto por Keshtkaran y para el filtro ACC un desarrollo propio.

2.3 Evaluación

El parámetro para evaluación es relación señal a ruido (SNR_{dB}), calculado para cada una con ecuación (19).

$$SNR_{dBj} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N |x_{ji}|}{N} \times \frac{P}{\sum_{i=1}^P |b_{ji}|} \right) \quad (18)$$

Donde x_{ji} es cada muestra de la señal la MCV para la j -ésima señal, N es el número total de muestras, b_{ji} es cada muestra de la señal de un período periodo sin contracción muscular que se toma como referencia para un tiempo constante, P es el número de muestras del período. Para la evaluación de la efectividad de los métodos de filtrado se aplicó lo siguiente:

- Una prueba de hipótesis con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para la SNR_{dB} promedio de cada uno de los sujetos de prueba. La hipótesis nula es que no hay diferencias entre los valores promedio, esto es, $H_0: \mu_1 \neq \mu_2$, y la hipótesis alternativa es que estos son diferentes $H_1: \mu_1 = \mu_2$ (dos colas).
- Una prueba de hipótesis con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para la varianza de la SNR_{dB} promedio donde $H_0: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ y $H_1: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$.
- Un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para determinar las diferencias entre los métodos de filtrado con un nivel de significación $\alpha = 0,05$.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizó el registro de datos de los siete sujetos de prueba y sus 55 señales diferenciales. Además, se calculó la SNR_{dB} de la señal diferencial. La Figura 6 muestra una comparación de los resultados en el sujeto de prueba 3, cada línea de color (azul: original, rojo: filtro RRLS y verde: filtro ACC) es el valor SNR_{dB} en cada canal diferencial. Los filtros muestran una mejora en la relación siendo similar en los canales 1 a 11 (correspondientes a la primera columna de la izquierda, del arreglo de sensores) y un poco mayor para los demás canales en el caso del filtro ACC.

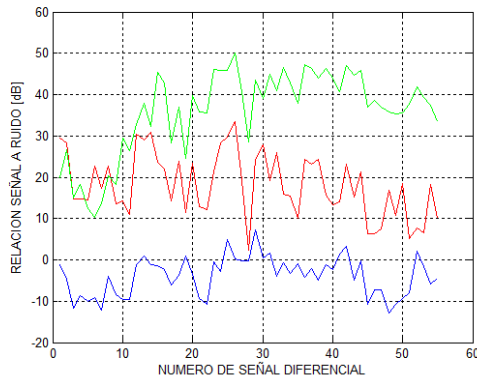


Figura 6. Relación señal a ruido de cada canal diferencial en el sujeto de prueba 3; azul: señal inicial, verde: señal filtrada ACC, y rojo: señal filtrada RRLS

La Figura 7 muestra una comparación relativa, que depende de la posición en la matriz del sensor. En ambas figuras se puede apreciar una mejora en la SNR_{dB} para los dos filtros propuestos, especialmente para el filtro ACC.

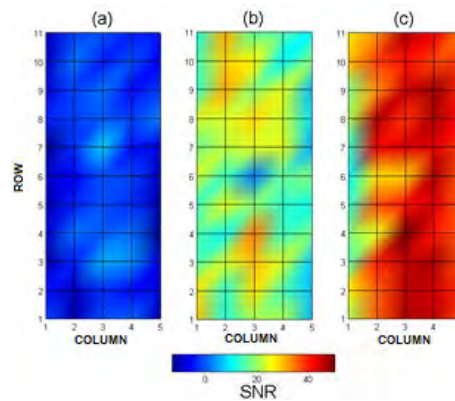


Figura 7. Comparación relativa de la SNR_{dB} en el sujeto de prueba 3, (a) señal base, (b) Filtro RRLS, y (c) filtro ACC

La Figura 8 muestra la PSD (método de Welch-Bartlett) para uno de los canales diferenciales (35) del sujeto 3. En la señal inicial (a) se observan las líneas de interferencia a 60 [Hz] y hasta el 5° armónico; en (b) se identifica una mejora en la SNR, una disminución en la fundamental y armónicos, sin embargo, se observa la aparición de armónicos de orden superior que no son evidentes en la señal original; el filtro ACC (c) muestra una notable mejora en la SNR, y la persistencia, aunque atenuada, de la fundamental, la segunda y la tercera armónica.

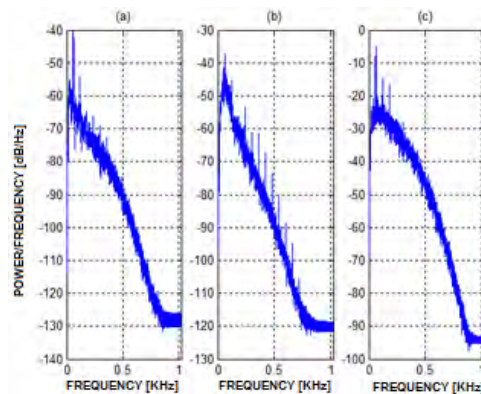


Figura 8. PSD comparativa, sujeto 3, señal diferencial 35, (a) inicial, (b) filtro RRLS, y (c) filtro ACC

La Figura 9 muestra una perspectiva diferente para las mismas señales (sujeto 3, canal diferencial 35). Las líneas espectrales muestran el ruido en la señal original. En la señal con el filtro RRLS se identifica la atenuación de la fundamental y primer armónico, pero se nota una ligera aparición de armónicos superiores. Para el filtro ACC, se nota un enriquecimiento del espectro de la señal hacia las bajas frecuencias

(de 150 a 200 [Hz]), se identifica una disminución apreciable de la interferencia, y se observa una ligera persistencia de la fundamental y primer armónico en la señal resultante del filtro. La señal obtenida del filtro RRLS parece incorporar, en algunos casos, componentes de frecuencia de la PLI. Esto probablemente se deba al algoritmo que enriquece el primer armónico en la primera parte, para poder calcular sin esfuerzo los siguientes armónicos, sin poder eliminarlos por completo en etapas posteriores.

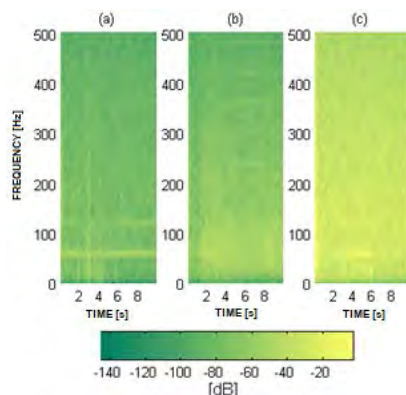


Figura 9. Espectrogramas comparativos, sujeto 3, señal diferencial 35, (a) inicial, (b) filtro RRLS, y (c) filtro ACC

En la Tabla 1 se muestra el resultado del cálculo del valor promedio y la estimación de la desviación estándar para las señales inicial y filtrada. Además, la señal filtrada por ACC muestra el número de componentes canónicos que tienen un coeficiente de correlación igual o superior a 0,9 que se utiliza como criterio para seleccionar el número de elementos que reconstruirán la señal bajo análisis

Tabla 1. Estadísticos básicos: \bar{x} , valor promedio y σ , desviación estándar de la relación señal a ruido.

Prueba	Inicial		Filtro RRLS		Filtro ACC		\bar{x}	σ
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	Componentes			
1	-0,83	9,93	11,95	10,62	14	38,64	22,40	
2	6,89	5,29	10,49	6,03	33	39,14	8,03	
3	-3,93	4,67	18,33	7,67	19	35,83	10,22	
4	13,92	6,09	16,81	6,15	25	49,60	6,75	
5	10,09	6,90	13,53	6,14	21	50,37	7,40	
6	29,52	14,17	31,41	12,39	38	54,65	9,15	
7	13,34	7,52	18,92	5,80	16	54,27	8,68	

La Tabla 2 muestra los resultados del análisis de varianza de una vía de los valores medios de SNR. El estadístico de prueba es el valor F de 32.88. Usando el nivel de error α de 0.05, se tiene $F_{0,05;2,18} = 3.55$. Dado que las estadísticas de prueba son mucho mayores que el valor crítico, se rechaza la hipótesis nula del proceso, lo que significa que hay una diferencia significativa en el valor de la relación señal-ruido en las condiciones dadas de experimentación y post procesamiento de datos. tratamiento.

Tabla 2. ANOVA para el valor medio de la SNR

Fuente	SS	DF	MS	F
Tratamiento	5.116,19	2	2.558,10	32,88
Error	1.400,43	18	77,80	
Total	6.516,62	20		

Se aplicaron dos pruebas de comparaciones de rangos múltiples (prueba de Duncan y de Tukey), mostrando resultados similares: las diferencias significativas del ANOVA están entre el valor medio de SNR del método ACC en comparación con la señal inicial y la señal del método RRLS. También indica que no hay diferencia estadísticamente significativa entre el método RRLS y la señal inicial, aunque el valor absoluto es mayor.

4. CONCLUSIONES

Se probaron dos métodos para disminuir la PLI: el Análisis de Correlación Canónica y un algoritmo Robusto RLS. Las señales fueron tomadas mediante la técnica de la medición electromiográfica superficial multicanal

o de alta densidad en el músculo tibial anterior de siete sujetos de prueba que se sometieron a un protocolo experimental en el que se obtuvieron registros de señal base y señal del MCV. La comparación se realizó con el cálculo de la relación señal/ruido promedio de cada sujeto y el análisis de varianza de una vía.

El algoritmo del filtro RRLS requiere la inicialización de parámetros dentro de los rangos propuestos [9]. Para el análisis se realizó una optimización mediante superficies de error cuadrático medio y un algoritmo de pasos descentralizados. Generalmente funciona para alrededor del 90% del total de las señales evaluadas como mejora de la relación señal/ruido. En el resto, no fue posible disminuir la presencia de las líneas de interferencia. Con lo anterior, se deben explorar otros métodos de optimización para establecer los valores de las variables de inicialización del filtro. En algunas ocasiones se aprecian incrementos en las líneas espectrales armónicas a altas frecuencias, ya que el algoritmo estima una frecuencia fundamental que, una vez fijada, crea unas frecuencias armónicas correspondientes que, no logran ser eliminadas en los siguientes procesos.

El número de componentes canónicos utilizados en cada prueba utilizados para la reconstrucción de la señal de interés depende del criterio de la correlación ordenada, de mayor a menor; para este estudio se eligió un valor de 0,9, donde se obtuvieron diferentes números de componentes para cada sujeto de prueba. El complemento de este criterio debe explorarse con la consecución de una mejor caracterización de la señal obtenida tras el filtro.

Cualitativamente, la señal diferencial se caracteriza mejor con el filtro RRLS que con el filtro ACC. Los resultados mostrados en la Figura 7 indican que para la mejora de la evaluación es necesario establecer unos criterios de selección de los canales (señales diferenciales). El estudio no consideró la discriminación de los sujetos por edad, sexo o percentiles morfológicos debido a la posible discriminación de la señal según el punto de inervación y la distancia relativa entre sensores.

Dados los resultados numéricos obtenidos, se considera pertinente aumentar el número de sujetos de prueba para aumentar la certeza estadística y estudiar otras características de la señal diferencial típica que se puedan comparar.

El estudio debe complementarse con la exploración de métodos de filtrado estadístico, otros algoritmos, que apunten a ser implementados con sistemas que permitan el uso en línea durante el registro de datos y no en postproceso; esto se prevé posible por el mejoramiento de la capacidad de cómputo actual, la mejora en sensores y la facilidad de implementar sistemas electrónicos de instrumentación de alta velocidad.

REFERENCIAS

- [1] Bingham A. et al. (2017). Normalised mutual information of high-density surface electromyography during muscle fatigue. *Entropy* 19(12), 1-14.
- [2] Merletti R. et al. (2009). Technology and instrumentation for detection and conditioning of the surface electromyographic signal: State of the art. *Clinical Biomechanics* 24(2), 122-134.
- [3] Marco G. et al. (2017). Surface EMG and muscle fatigue: Multi-channel approaches to the study of myoelectric manifestations of muscle fatigue. *Physiological Measurement* 38(5), R27-R60.
- [4] Marateb H. et al. (2016). Detection of multiple innervation zones from multi-channel surface emg recordings with low signal-to-noise ratio using graph-cut segmentation. *PLoS One* 11(12), 1-23.
- [5] Mancebo F. et al. (2019). Innervation zone locations distribute medially within the pectoralis major muscle during bench press exercise. *Journal Electromyography and Kinesiology* 46, 8-13.
- [6] Rojas M. et al. (2017). Identificación de tareas isométricas y dinámicas del miembro superior basada en EMG de alta densidad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 14, 406-411.
- [7] Al Harrach M. et al. (2017). Denoising of HD-sEMG signals using canonical correlation analysis. *Medical & Biological Engineering & Computing* 55(3), 375-388.
- [8] Chowdhury R. et al. (2013). Surface electromyography signal processing and classification techniques. *Sensors* 13(9), 12431-12466.
- [9] Keshtkaran M. y Yang Z. (2014). A Fast, robust algorithm for power line interference cancellation in neural recording. *Journal of Neural Engineering* 11, 1-20.

- [10] Nishihara K. et al. (2010). Effect of position of electrodes relative to the innervation zone on surface EMG. *Journal of Medical Engineering & Technology* 34(2), 141–147.
- [11] Uurtio V. et al. (2018). A Tutorial on Canonical Correlation Methods. *ACM Computing Surveys* 50(6), 95/1–95/33.
- [12] De Clercq W. et al. (2006). Canonical correlation analysis applied to remove muscle artifacts from the electroencephalogram. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 53(12), 2583–2587.
- [13] Carrasco C. (2016). *Electromiografía Superficial Multicanal en Músculo Tibial Anterior*. Trabajo de grado maestría. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia.
- [14] Correa J. et al. (2016). Sistema de Adquisición de Señales SEMG para la Detección de Fatiga Muscular. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica* 37(1), 17–27.

Sistema automatizado para la compensación de energía reactiva usando redes Neuronales

Verena Mercado Polo¹
Lizeth Cortes Hernández²
Miguel Antonio Peña Totaitive³
Jarvey Leonardo González Montañez⁴
Unidades Tecnológicas de Santander
Colombia

Se presenta el diseño de un sistema automatizado basado en redes Neuronales para mejorar el factor de potencia a través de un controlador lógico programable PLC. Para el desarrollo se tomaron registros de las variables eléctricas en cuatro subestaciones del campamento el Cedral en Hidrosogamoso, Colombia, con un analizador de redes para verificar el consumo de energía reactiva y determinar el tamaño del banco de condensadores. Se seleccionó la Subestación 2 por presentar mayor consumo de energía reactiva. Definida la subestación se determinaron los condensadores y pasos necesarios para corregir el factor de potencia y se creó la base de datos para generar la Red Neuronal. Se seleccionó la Red Neuronal tipo Perceptron Multicapa, teniendo en cuenta el error mínimo para su entrenamiento y aprendizaje, y se comprobó mediante SIMULINK y el Lenguaje de Control Estructurado SCL. Para implementar el sistema automatizado de corrección de factor de potencia se integró el PLC, el medidor multifuncional y el banco de condensadores para adquirir los datos directamente y evaluar el funcionamiento de la programación de la Red Neuronal. Se realizaron pruebas a la subestación, donde se evidenció el funcionamiento de la red neuronal a través del PLC, logrando una corrección de factor de potencia en las tres fases y activando los condensadores necesarios en tiempo real. Los resultados obtenidos se compararon con los del Regulador automático de Factor de Potencia YPR-7 de Yuhchang Electric Ltda., instalado en la Subestación.

¹ Ingeniera Electricista, Especialista y Magíster en Automatización e Informática Industrial.

Contacto: verenadejesus@correo.uts.edu.co

² Ingeniera Electrónica y Magíster en Ingeniería Electrónica.

Contacto: lizethcortes@correo.uts.edu.co

³ Ingeniero Electricista.

Contacto: mtotaitive@gmail.com

⁴ Ingeniero Electricista.

Contacto: fanton_93@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Entre los acuerdos planteados por Colombia ante las Naciones Unidas, relacionados con el Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, se contempla el plan energético nacional enfocado al ahorro energético y la eficiencia energética, y se abordan temas afines al sector industrial, por lo que, se debe buscar la eficiencia energética en este sector, ya que representa el 22% del consumo energético del país [1].

El desarrollo industrial requiere del uso de diferentes dispositivos, entre los que se destacan motores y elementos de electrónica de potencia con componentes no lineales que afectan la calidad y eficiencia de la energía en los sistemas eléctricos, esto requiere de esfuerzos de los usuarios finales para cumplir con las normativas establecidas por los entes reguladores, ya que la eficiencia y calidad de la energía eléctrica implica un conjunto de parámetros eléctricos que caracterizan las instalaciones eléctricas en un punto determinado [2].

La falta de eficiencia y calidad de energía está asociada a variaciones de tensión y frecuencia, además de grandes pérdidas en los sistemas eléctricos, por lo que es necesario buscar técnicas que permitan mejorar la calidad de energía y mitigar los efectos negativos en las redes eléctricas, esas técnicas se relacionan con dispositivos conformados por capacitores e inductores, sin embargo, esas técnicas deben ser controlables en función del requerimiento en un determinado momento [3].

La potencia reactiva es necesaria para las cargas inductivas, ya que origina un flujo electromagnético para su correcto funcionamiento, es un requerimiento para las cargas que contienen devanados como transformadores, motores, hornos, balastos, equipos de soldadura, entre otros, lo que hace que estos equipos trabajen con un factor de potencia menor a 0,9 [4]. Sin embargo, si la energía reactiva es elevada producirá un factor de potencia menor a 1, lo que puede provocar inconvenientes en la red del usuario [5], como el sobrecalentamiento en los conductores y en los transformadores, debido al aumento en la corriente que produce el incremento de la energía reactiva, provocando caídas de tensión y pérdidas de la capacidad de los transformadores, lo que demandará más energía en los generadores y en los distribuidores locales porque deben entregar más energía para tal fin [6].

Mejorar el factor de potencia resulta ser una estrategia técnica adecuada para mejorar la eficiencia de la energía eléctrica en el sector industrial [7], la resolución CREG 015, exigen que el factor de potencia en las instalaciones industriales sea mayor a 0,90, por lo que es necesario instalar equipos para su corrección, ya que, un bajo factor de potencia produce efectos en la red, al presentar calentamiento en los conductores por el exceso de corriente, produciendo disminución en el voltaje, pérdidas de capacidad de potencia en los transformadores y aumento de la temperatura por la mayor demanda de KVA [8], lo que genera sobrecostos en la factura de energía, por el no cumplimiento a la normativa establecida por la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG; aumento de las pérdidas por el incremento de la corriente y por ende aumento en la emisiones de CO₂ por la mayor demanda de energía en los generadores [9].

Se han utilizado reguladores basados en técnicas analíticas, de programación numérica, heurísticas e inteligencia artificial que actúan de acuerdo con la programación establecida para corregir el factor de potencia, los cuales trabajan con diversas señales como temperatura, tiempo, corriente, tensión, potencia activa, potencia reactiva y señales compuestas, pero no tienen la *inteligencia y precisión* para conectar con exactitud la cantidad de condensadores en un mínimo tiempo [10], en la actualidad se han realizado trabajos para mejorar el factor de potencia con técnicas de control inteligente para el control de tensión en subestaciones de distribución de media y alta tensión, sin embargo, ha sido poca la incursión de las redes neuronales usando controladores lógico programable (PLC) en la industria de baja tensión [11]. Por lo anteriormente expuesto surge la siguiente pregunta: ¿cómo se puede desarrollar un sistema automatizado de corrección de potencia reactiva usando Redes Neuronales Artificiales aplicado a un controlador lógico programable PLC para cualquier tipo de usuario?

Por lo anterior, es necesario para la industria tener alternativas que mitiguen o eliminen la energía Reactiva de sus instalaciones, por lo cual la elaboración de una Red Neuronal Artificial que permita una manera eficiente y rápida la corrección del factor de potencia sería una buena estrategia para los sistemas eléctricos

en general [10], con una estructura basada en MATLAB por medio de la herramienta NNSTART y SIMULINK con la que se puede verificar la efectividad de la respuesta a la salida de acuerdo a las entradas establecidas de la Red Neuronal, para luego ser implementadas en el Controlador Lógico Programable (PLC) S71200 de SIEMENS, que activara los condensadores necesarios para la corrección del factor de potencia, logrando así la reducción del consumo de energía reactiva por parte de la industria y el cumplimiento de los requerimientos exigidos en el capítulo 12 de la resolución 015 del 2018 de la CREG.

2. MÉTODO

Esta investigación se llevó a cabo utilizando una metodología descriptiva, de análisis y de campo, ya que fue necesario observar y caracterizar el problema del consumo de Energía Reactiva en cuatro Subestaciones eléctricas del Campamento el Cedral, a través de la recolección de información en cada Subestación, lo cual se realizó por medio de un analizador de redes que registra las condiciones existentes en tiempo real. Con esta información se establece una base de datos, que permita definir, que subestación presenta mayor consumo de energía reactiva y a la Subestación que presente mayor consumo de energía Reactiva, se realiza un análisis cuantitativo de los datos obtenidos a través de Excel para obtener y definir los rangos a través de un histograma para establecer la escala del Banco de Condensadores.

Para el desarrollo del proyecto se realizaron cinco fases, las cuales se muestran en la Figura 1. En la fase 1 se revisa información relacionada con la normativa vigente en Colombia; en la fase 2 se describen las características de los sistemas industriales con alta potencia reactiva, sus efectos y consecuencias; en la fase 3 se realiza un análisis de los datos de la energía reactiva mediante un analizador de redes, para obtener los consumos máximos y mínimos de la energía reactiva, con el fin de obtener el banco de condensadores a utilizar; en la fase 4 se determina el modelo de la Red Neuronal Artificial, utilizando el software de MATLAB, el cual genera el lenguaje de control estructurado que es compatible con algunos PLC, luego, por medio del software adecuado se introduce el código al PLC para simular el programa y verificar que su funcionamiento este acorde a lo programado, y por último, en la fase 5 se valida el funcionamiento mediante la instalación de un prototipo en la Subestación.

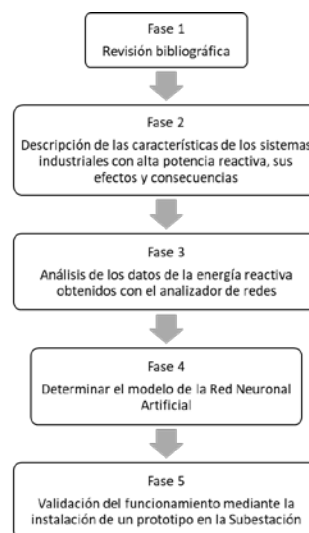


Figura 1. Fases del proyecto de investigación

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Características de los sistemas con alta potencia reactiva

Las instalaciones eléctricas industriales y comerciales requieren equipos para la refrigeración, calefacción, sonido, iluminación, transformación, movimiento, entre otros, los cuales necesitan del suministro de Potencia Activa y Reactiva del Sistema Eléctrico Nacional para su funcionamiento, el desarrollo tecnológico de la mayoría de estos equipos ha incrementado el consumo de la Potencia Reactiva lo que ocasiona la disminución del Factor de Potencia, aumento de las pérdidas del Sistema Eléctrico Nacional y disminución

de la capacidad efectiva en la instalación. En Colombia el mayor consumo de la energía está en las diferentes industrias y comercios que se encuentran interconectados en las ciudades, por lo tanto, tener un Factor de Potencia por debajo de 0,9 produce efectos y consecuencias en el Sistema Interconectado Nacional SIN y en las instalaciones internas de los usuarios, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Efectos y consecuencias de la alta energía reactiva [12, 13]

	Efectos	Consecuencias
Sistema Interconectado Nacional (SIN)	▪ Exceso de demanda de Potencia Reactiva	▪ Desbalance en la tensión
	▪ Variación en la tensión	▪ Inestabilidad que conlleva al aislamiento de algunas zonas o un apagón nacional
	▪ Sobrecalentamiento en Generadores	▪ Disminución de la vida útil del generador
	▪ Bajo factor de Potencia	▪ Incremento en los costos de la energía eléctrica.
		▪ Aumento de las pérdidas eléctricas.
	▪ Incremento o sobrecarga de la Potencia Aparente.	▪ Sobrecalentamientos en generadores y transformadores.
Instalaciones internas de los usuarios	▪ Pérdidas en la capacidad efectiva de las líneas y transformadores eléctricos.	▪ Necesidad de aumentar la capacidad de la red eléctrica
	▪ Aumento del consumo de corriente	▪ Mayores pérdidas eléctricas (I ² R)
	▪ Variación de la tensión	▪ Fallas críticas en los equipos electrónicos
	▪ Incremento en la corriente	▪ Aumento de la temperatura en conductores y transformadores eléctricos.
		▪ Aumento de las pérdidas por efecto Joule.
	▪ Exceso de Energía Reactiva que sobrepasa los límites establecidos	▪ Disminución de la vida útil y la capacidad efectiva de los equipos eléctricos.
		▪ Aumento en la facturación y sanciones por bajo factor de potencia.

3.2 Técnicas de corrección, ventajas y desventajas

Según [14] existen varios equipos para la corrección del factor de potencia, entre las más sobresalientes se destacan:

- Compensador síncrono, es un motor que funciona sin carga el cual está diseñado para producir o consumir Potencia Reactiva.
- Generador Síncrono, puede producir o consumir Potencia Reactiva a través de la variación de la corriente de excitación en el rotor.
- Compensadores Estáticos, equipos basados en electrónica de potencia para controlar la Potencia Reactiva a través de tiristores que conectan Reactores (TCR) o Condensadores (TSC) de acuerdo con las necesidades de la red.
- Filtros activos, a nivel de funcionamiento, son iguales que los compensadores estáticos, pero en niveles de baja tensión, su mayor uso es para corregir los armónicos que producen las cargas no lineales en la red.
- Bancos de condensadores estáticos, es el elemento que mayor uso tiene para corregir el factor de potencia en todos los niveles de tensión, tienen la capacidad de almacenar y entregar campo eléctrico para compensar los excesos de Potencia Reactiva, su precio es el más bajo de los diferentes tipos de compensación y facilidad para su conexión.
- Bancos de condensadores automatizados: corrigen el factor de potencia en sistemas con demanda de energía variable y cargas no lineales con necesidades de carga reactiva variable en baja tensión.

En la Tabla 2 se muestran las ventajas y desventajas de corregir el factor de potencia.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de compensar la energía reactiva [14]

Ventajas	Desventajas
▪ Económicas, porque se elimina las sanciones por el exceso de consumo de	▪ A nivel técnico, cuando se conectan los condensadores a través de contactores trifásicos al barraje, pueden producir incremento o disminución en la tensión del barraje provocando transitorios en la red, los cuales, afectan a los equipos que son sensibles a estas

Potencia Reactiva, también el consumo mensual de la energía por el menor consumo de corriente.

- Calidad en la Instalación, porque estabiliza la tensión y libera capacidad en los transformadores y conductores.

perturbaciones (electrónicas), sin embargo, esta condición puede ser mitigada por relés de estado sólido (tiristores) que solo conectan los condensadores cuando la onda de tensión de la red pasa por cero, con el objetivo de eliminar las sobre o sub tensiones que generan las perturbaciones de la red.

- Cuando la carga presenta corrientes armónicas que están superpuestas a la frecuencia fundamental de 60 Hz crean voltajes armónicos en las impedancias de la carga, lo que genera una distorsión de la forma de onda, esto afecta significativamente los bancos de condensadores, porque disminuye la impedancia de los condensadores, produciendo fallas en los mismos, debido al fenómeno de resonancia donde $X_L = X_C$.

3.3 Registro de las variables eléctricas obtenidas

Para el registro de las variables eléctricas de las cuatro subestaciones se utilizó un analizador de redes marca FLUKE 435 Categoría III (Hasta 600 V), que permite la configuración de acuerdo al nivel de tensión. En el menú se proporcionan las funciones predeterminadas para el registro de datos como son: Voltios/Amperios/Hz, Fluctuaciones, Armónicos, Potencia/Energía, Desequilibrio, Parpadeo (Flicker) y transitorios.

También cuenta con la tecla Logger que permite insertar hasta 150 variables diferentes que se deseen analizar. Para medir las variables eléctricas se instaló el analizador de redes a la salida del interruptor principal que alimenta el barraje de las cargas en cada Subestación como se muestra en las Figuras 2 y 3.

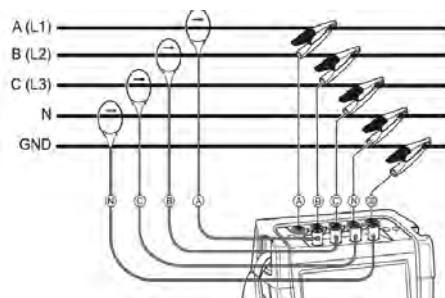


Figura 2. Esquemático de conexionado del analizador de redes

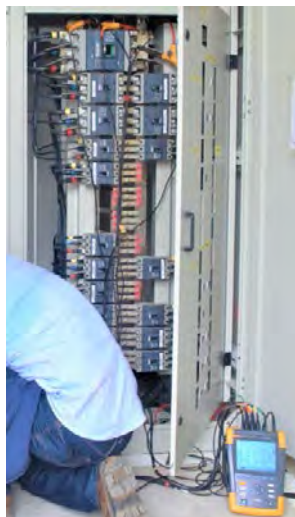


Figura 3. Conexión física a la salida del interruptor principal

Se obtienen los registros del analizador de redes durante 6 días con sus respectivos controladores de factor de potencia conectados, se exportan los archivos y se grafican las potencias Activas, Reactiva y FP, como se muestran en las Figuras 4, 5, 6 y 7, para las cuatro subestaciones eléctricas tomadas de referencia.

De las Figuras 4, 6 y 7, correspondientes a las subestaciones 1, 3 y 4, se destaca que el factor de potencia se encuentra entre 0,8 y 1, con pocos valores menores a 0,8, y de la Figura 5 se destaca que el factor de potencia en la subestación 2 presenta muchas variaciones, el factor de potencia es muy bajo, llegando a 0,4 y en algunos momentos el factor de potencia se vuelve capacitivo, no se mantiene en un rango.

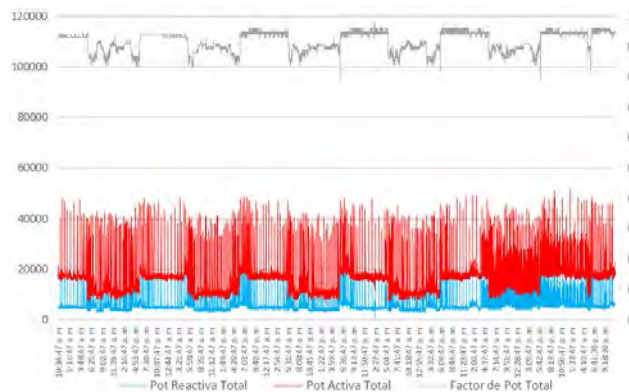


Figura 4. Potencia Activa, Reactiva y FP Subestación 1

Se selecciona la subestación 2, por presentar mayor demanda de energía Reactiva inductiva y también porque el controlador del factor de potencia existente de la marca Yunchang, está entregando más energía capacitiva de la requerida por la carga, lo que afecta el factor de potencia como se muestra en la Figura 5, donde se destaca, que los primeros 3 días estaba con el equipo de corrección de factor de potencia conectado y en los siguientes 3 días con el equipo de corrección de factor de potencia desconectado.

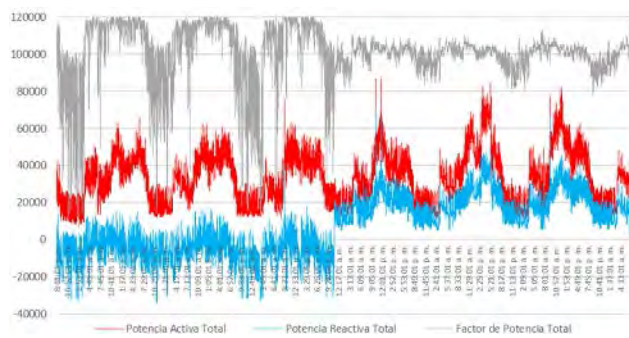


Figura 5. Potencia Activa, Reactiva y FP Subestación 2

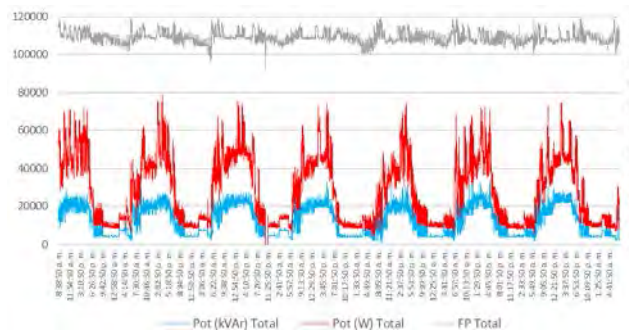


Figura 6. Potencia Activa, Reactiva y FP Subestación 3

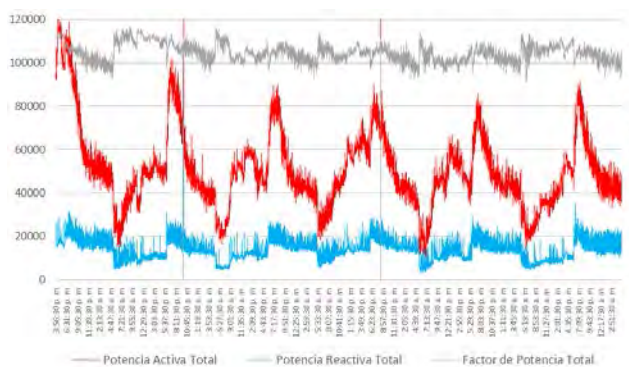


Figura 7. Potencia Activa, Reactiva y FP Subestación 4

Cada Subestación cuenta con un sistema de compensación de 6 etapas donde la etapa 1 tiene 1 condensador trifásico de 20 kVAR, las etapas de la 2 a la 6 cuentan con condensadores trifásicos de 10 kVAR y un paso fijo de 20 kVAR, en la Figura 5 se muestra que la compensación en la subestación 2 no está

operando de forma adecuada debido a que los condensadores superan la Potencia Reactiva de las cargas, de acuerdo a los datos obtenidos del analizador se toman los valores menores, mayores y promedio de las potencias aparente, activa, reactiva y factor de potencia de los registros obtenidos sin el equipo de corrección de factor de potencia conectado. En la Tabla 3 se muestran los valores menores, mayores y promedio de las potencias aparente, activa, reactiva y factor de potencia.

Tabla 3. Valores registro Subestación 2

Descripción	Potencia Aparente kVA	Potencia Activa kW	Potencia Reactiva kVAR	Factor de Potencia
Mínima	12,56	11,01	4,65	0,74
Máxima	111,60	87	69,9	0,89
Promedio	34,47	30,02	16,86	0,85

Utilizando la ecuación (1) se calcula la potencia reactiva necesaria para el banco de condensadores, con el valor promedio de la potencia Activa del registro de acuerdo con las recomendaciones de los diferentes fabricantes.

$$Q_c = P * (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$Q_c = 30,02 * (\tan 42,27 - \tan 0) \quad (1)$$

$$Q_c = 27,29 \text{ kVAR}$$

Conocida la potencia reactiva que se requiere para el banco de condensadores se le aplica un 25% adicional previendo un incremento de la carga a futuro. (ecuación (2)).

$$Q_c = 1,25 * 27,29 \text{ kVAR} = 34,22 \text{ kVAR} \quad (2)$$

Como la subestación 2 tiene un banco de condensadores de 90 kVAR, de los cuales 70 kVAR están controlados por el equipo de corrección de factor de potencia, esta capacidad es el doble de la requerida por la Subestación, en la Figura 8 se muestra el Histograma de como operarían los condensadores con los que cuenta la Subestación.

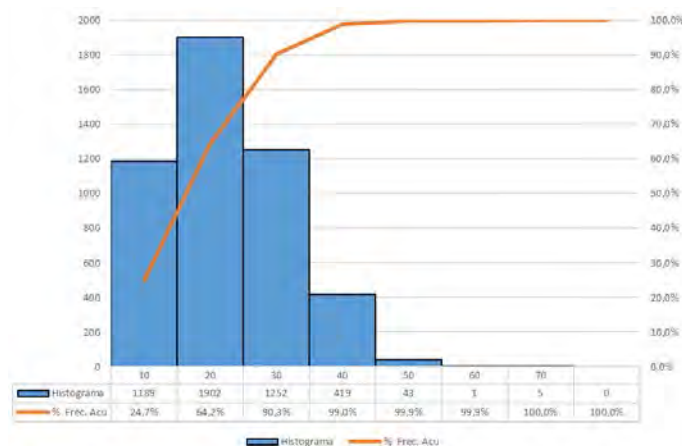


Figura 8. Condensadores Actuales

En la Tabla 3, la potencia reactiva promedio del registro del analizador de la subestación 2 es de 16 kVAR; en el Histograma de la figura 8, se destaca que el mayor número de registros está en la columna de 20 kVAR, equivalente a 1902 datos, como se muestra en la tabla inferior de la Figura 8.

Como los valores de la potencia reactiva que se presentan durante la medida de los tres días sin el compensador de potencia reactiva conectado es muy variable, los valores del banco de condensadores de la subestación no permiten realizar un ajuste fino a la compensación, quedando la compensación por arriba del valor de la potencia reactiva de la carga, por lo que se genera un nuevo Histograma cambiando los pasos de 10 a 2,5 kVAR, como se muestra en la Figura 9.

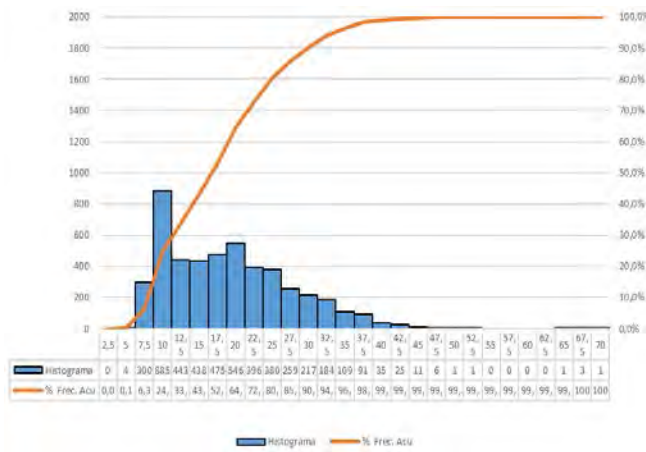


Figura 9. Condensadores con pasos de 2,5 kVAR

3.4 Red neuronal artificial

Primeramente, se determina el tipo de aprendizaje que se va a implementar en la red neuronal, el aprendizaje más adecuado para la aplicación es el supervisado porque se cuenta con datos de entrada que pueden ser clasificados y etiquetados para luego definir las salidas correspondientes. Como este aprendizaje se basa en modelos predictivos, los datos de entrada y salida se utilizan en las fases de entrenamiento y prueba del modelo, buscando lograr el ajuste y el aprendizaje necesario con base en la estimación del error del resultado final.

Con los valores que arrojó el analizador de redes en la subestación 2, se clasifican los datos de menor a mayor, para entrenar la red neuronal, con el fin de determinar los pasos necesarios para la activación de los condensadores y por ende realizar la corrección del factor de potencia. La primera red consta de una capa de entrada con tres señales analógicas: potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia, y una capa de salida con cinco señales binarias, las cuales se relacionan con la activación de los condensadores de 2,5 kVAR, 5 kVAR, 10 kVAR, 20 kVAR y 20 kVAR, como se muestra en la Figura 10.

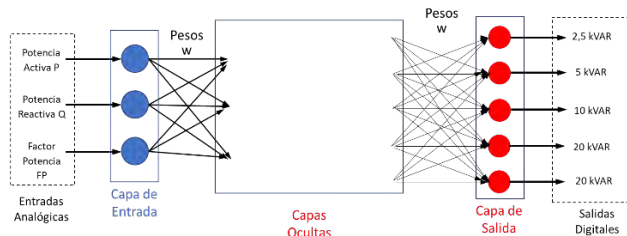


Figura 10. Red Neuronal Artificial Inicial

El objetivo del entrenamiento para estas tres entradas analógicas es obtener el valor más preciso de los pesos y las bias necesarios con la capa de entrada y la primera capa oculta, para verificar su adecuado funcionamiento en la práctica.

Durante las dos primeras pruebas de la implementación de la primera Red neuronal artificial entrenada, no se logró el funcionamiento adecuado de las salidas del PLC, por lo tanto, como no se obtuvo la activación de los condensadores, se reestructuró, quedando una sola entrada, la cual es la potencia reactiva, como se muestra en la Figura 11.

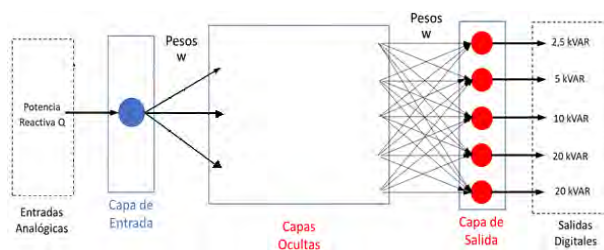


Figura 11. Red Neuronal Artificial final a implementar

La nueva red queda con una señal analógica (potencia reactiva) de entrada y una capa de salida con cinco señales binarias, las cuales se relacionan con la activación de los condensadores de 2,5 kVAR, 5 kVAR, 10 kVAR, 20 kVAR y 20 kVAR, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Entradas y Salidas de la Red Neuronal Simplificada

Entradas Q(kVAR)	Salidas. Pasos banco de condensadores				
	2,5 kVAR	5 kVAR	10 kVAR	20 kVAR	20 kVAR
0	0	0	0	0	0
0,01	0	0	0	0	0
0,02	0	0	0	0	0
2,7	1	0	0	0	0
2,71	1	0	0	0	0
2,72	1	0	0	0	0
5,53	0	1	0	0	0
5,54	0	1	0	0	0
5,55	0	1	0	0	0
8,05	1	1	0	0	0
8,06	1	1	0	0	0
8,07	1	1	0	0	0
10,30	0	0	1	0	0
10,31	0	0	1	0	0
10,32	0	0	1	0	0
13,66	1	0	1	0	0
13,67	1	0	1	0	0
13,68	1	0	1	0	0
36,90	0	1	1	0	1
36,91	0	1	1	0	1
36,92	0	1	1	0	1
46,00	0	1	0	1	1
46,01	0	1	0	1	1
46,02	0	1	0	1	1
50,30	0	0	1	1	1
50,31	0	0	1	1	1
50,32	0	0	1	1	1
59,94	1	1	1	1	1
59,95	1	1	1	1	1

Para la implementación en Matlab se sigue el diagrama que se muestra en la Figura 12, donde se observa que se inicia con el ingreso de la base de datos, ingresando las variables de entrada y salida con el comando `nnstart` y se obtiene el modelo de la RNA, luego se continua con el entrenamiento de la red, la cual debe validarse realizando pruebas que se comparan con la tabla de entradas y salidas requeridas. Una vez entrenada y validada, se verifica con Simulink, para generar la programación que se utilizará en el PLC, y los demás componentes que conforman el sistema de control automático del banco de condensadores.

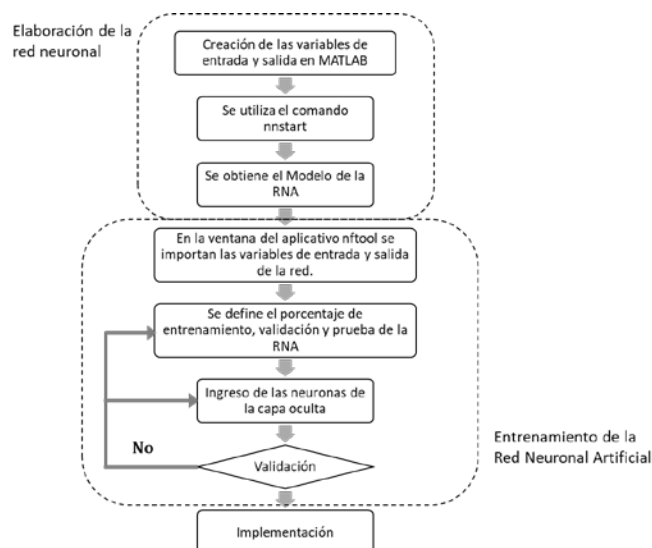


Figura 12. Diagrama para la obtención del modelo y entrenamiento de la RNA

En la Figura 13 se muestran los resultados del entrenamiento de la RNA luego de ingresar todas las variables en el módulo nftool, con el que se calculan los valores de los pesos y bias necesarios que permiten minimizar el error generado entre la entrada obtenida por la red y la salida deseada, estos pesos y bias se calculan de forma interactiva, por el método de entrenamiento Levenber-Marquardt.

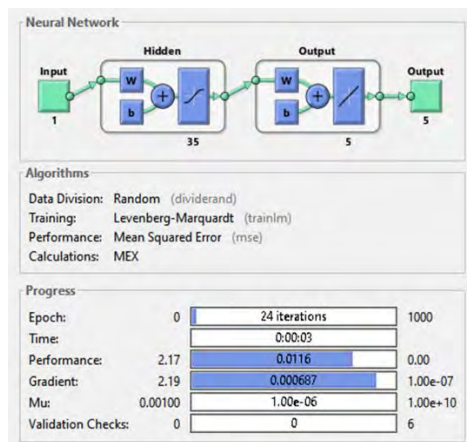


Figura 13. Entrenamiento de la red neuronal

Durante el entrenamiento, la validación y las pruebas de la RNA se debe tener en cuenta el error de la salida, el cual debes estar lo más cercano a cero, en la Figura 14 se muestra la evolución del entrenamiento.

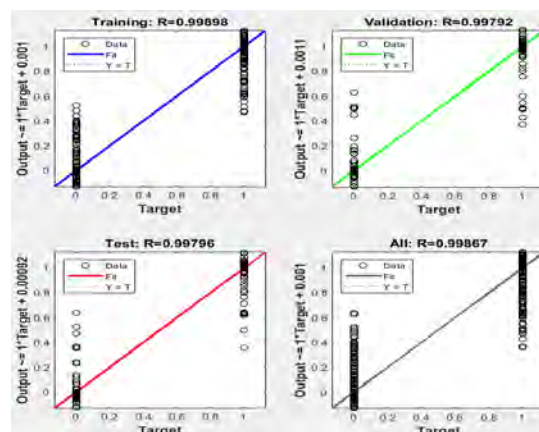


Figura 14. Estado del entrenamiento

En la Figura 15 se muestra la gráfica de Salida vs Error, donde se destaca mediante recuadros rojos los dos puntos de error que se presentan con la activación de la capacitancia, los cuales están ubicados en los rangos de 32,5 a 35 kVAR y de 52,5 a 55 kVAR, sin embargo, el error es menor del 1% por lo que se considera aceptable, porque tiene una baja probabilidad de activación debido a que la carga pocas veces trabajara en estos puntos de activación.

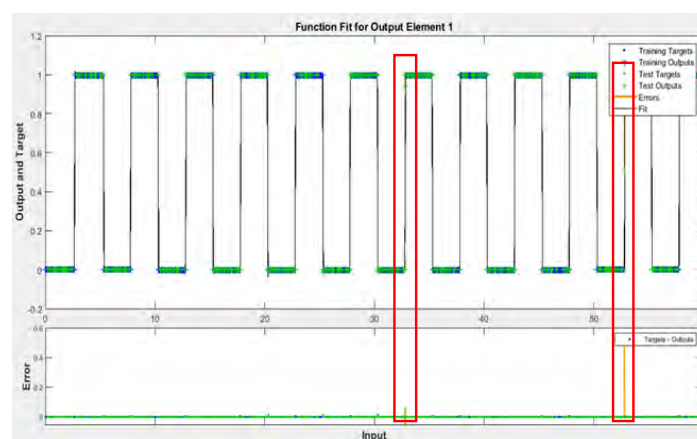


Figura 15. Salida vs Error

Finalizado el entrenamiento, el módulo nftool permite generar la Red Neuronal Artificial en Simulink, como se muestra en la Figura 16, donde se observa toda la RNA, Matlab tiene prestablecido que todas las RNA que se crean en su entorno, hacen un proceso previo de normalización de datos considerando el máximo y el mínimo por medio de la función *mapminmax*, lo que permite acomodar los datos para que no exista una diferencia amplia entre ellos y así lograr mayor eficiente al momento de ajustar los pesos, esto se conoce como *Process Input 1*, en el recuadro *Layer 1* se inicia la etapa 1, aquí la red empieza a realizar el proceso para calcular los pesos de las 35 neuronas de la capa oculta la cual corresponde al recuadro definido con la letra (W), con sus respectivas bias que corresponden al recuadro con la letra (b) acompañados de una suma de multiplicaciones y la función de activación tangencial sigmoideal; en el recuadro *Layer 2* se continua el proceso, en esta etapa se visualizan los recuadros de los pesos (W) y el bias (b) acompañados de una suma de multiplicaciones y su función de activación lineal para las 5 salidas de la red neuronal artificial; y en el recuadro *Process Output 1* se revierte el proceso de normalización de datos de entrada considerando el dato máximo y el mínimo por medio de la función *mapminmax_reverse* para deshacer la escala de forma automática y estimar los resultados.

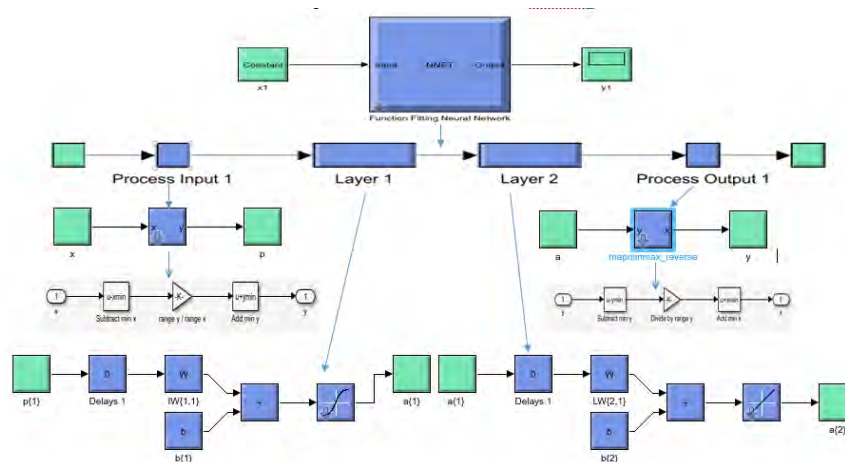


Figura 16. Red Neuronal Artificial en Simulink

En la Tabla 5 se presentan los pesos calculados de las 35 neuronas de la capa oculta con sus respectivas bias y en la Tabla 6 se presentan los pesos y bias calculados de las 5 neuronas de salida.

Tabla 5. Pesos y bias calculados de las 35 neuronas de la capa oculta.

Neurona	Peso calculado	Bias calculadas
1	-8329,601445	7717,30285
2	8789,598882	-8143,491137
3	8797,387562	-7417,595129
4	-9074,43087	7651,189144
5	11701,0276	-8892,76981
6	11701,02763	6153,548778
7	9326,941344	-6309,746387
8	21546,4621	-12780,64908
9	22693,28098	-11569,80091
10	8638,497859	-3684,39234
11	-8917,075406	3803,205287
12	9656,323494	-3313,662275
13	9312,241402	-3195,584438
14	-21901,06116	5690,617803
15	-22993,08799	4058,282263
16	8427,224546	-785,1368814
17	-7656,752615	76,31927143
18	-7801,566632	77,73787945
19	21994,65124	1616,603984
20	7499,556463	1175,167953
21	-7637,752747	-1196,84697
22	21918,51932	5264,095717
23	7870,642523	2545,118754
24	-7729,402337	-2499,422288

25	-21770,94714	-8857,133207
26	-9218,639385	-4518,596338
27	8966,391231	4394,952389
28	-21575,81129	-12373,72494
29	9359,211534	6147,51306
30	9086,49665	5968,385145
31	21342,26214	15796,83938
32	-22261,73546	-18332,53682
33	-4947,486591	-4503,036482
34	-4950,624839	-4505,945521
35	4950,721901	4505,928396

Tabla 6. Pesos y bias calculados de las 5 neuronas de salida

	Pesos					Bias				
	Salida 1	Salida 2	Salida 3	Salida 4	Salida 5	Salida 1	Salida 2	Salida 3	Salida 4	Salida 5
1	27,43921	-6,016370	3,04E-10	-1,45E-11	-7,74E-11	7717,302	7717,302	7717,302	7717,302	7717,302
2	1,000004	-5,91E-05	3,04E-10	-1,45E-11	-7,74E-11	-8143,491	-8143,491	-8143,491	-8143,491	-8143,491
3	27,87952	-10,872043	-1,58E-09	4,50E-11	6,52E-11	-7417,595	-7417,595	-7417,595	-7417,595	-7417,595
4	28,87952	-11,87204	-1,57E-09	4,50E-11	6,52E-11	7651,18914	7651,18914	7651,18914	7651,18914	7651,18914
5	1,000004	3,35E-07	1,13E-06	6,28E-15	7,85E-16	-8892,769	-8892,769	-8892,769	-8892,769	-8892,769
6	-28,1130886	-13,08598	13,08598	4,97E-10	3,71E-11	6153,54878	6153,54878	6153,54878	6153,54878	6153,54878
7	-27,11308	-14,08598	14,0859829	4,97E-10	3,71E-11	-6309,746	-6309,746	-6309,746	-6309,746	-6309,746
8	-1,000004	-3,20E-06	8,35E-07	1,90E-14	-4,13E-15	-12780,64	-12780,64	-12780,64	-12780,64	-12780,64
9	12,95633	1,000004	2,15E-09	-2,16E-09	-1,14E-15	-11569,80	-11569,80	-11569,80	-11569,80	-11569,80
10	11,956335	-0,000315	-7,87E-05	7,87E-05	8,63E-11	-3684,392	-3684,392	-3684,392	-3684,392	-3684,392
11	-1,0000053	-0,000312	-7,81E-05	7,81E-05	8,63E-11	3803,20529	3803,20529	3803,20529	3803,20529	3803,20529
12	-12,00142	-9,588368	-9,58836749	9,58836749	4,10E-11	-3313,662	-3313,662	-3313,662	-3313,662	-3313,662
13	11,00142	8,588369	8,58836895	-8,588368	-4,10E-11	-3195,584	-3195,584	-3195,584	-3195,584	-3195,584
14	1,000009	3,01E-06	8,30E-07	-8,30E-07	-2,00E-15	5690,6178	5690,6178	5690,6178	5690,6178	5690,6178
15	1,000010	-1,00000442	-4,09E-12	5,25E-12	5,30E-16	4058,28226	4058,28226	4058,28226	4058,28226	4058,28226
16	-442,0275	-2,79E-06	5,51E-07	1,05E-18	-2,93E-15	-785,1368	-785,1368	-785,1368	-785,1368	-785,1368
17	220,6008	-26,43918	26,4391877	-7,36E-13	-8,53E-11	76,3192714	76,3192714	76,3192714	76,3192714	76,3192714
18	-220,42667	27,4391865	-27,4391865	7,36E-13	8,53E-11	77,7378795	77,7378795	77,7378795	77,7378795	77,7378795
19	6,399400	2,17E-08	6,74E-07	1,29E-15	9,25E-15	1616,60398	1616,60398	1616,60398	1616,60398	1616,60398
20	7,399395	-27,87959	-3,10E-10	-3,05E-11	-1,08E-10	1175,16795	1175,16795	1175,16795	1175,16795	1175,16795
21	10,87213	-28,87959	-3,09E-10	-3,05E-11	-1,05E-10	-1196,846	-1196,846	-1196,846	-1196,846	-1196,846
22	11,87213	2,94E-07	-4,99E-07	-1,50E-15	4,99E-07	5264,09572	5264,09572	5264,09572	5264,09572	5264,09572
23	1,000001	-28,113146	-28,113146	-2,26E-11	28,113146	2545,11875	2545,11875	2545,11875	2545,11875	2545,11875
24	-13,0851128	-27,1131472	-27,1131472	-2,26E-11	27,1131472	-2499,422	-2499,422	-2499,422	-2499,422	-2499,422
25	-14,08511	-7,04E-07	6,37E-07	-6,11E-16	-6,37E-07	-8857,133	-8857,133	-8857,133	-8857,133	-8857,133
26	1,000008	-12,957243	-1,25E-09	1,34E-11	-1,66E-09	-4518,596	-4518,596	-4518,596	-4518,596	-4518,596
27	-1,000006	-11,95724	-1,25E-09	1,34E-11	-1,66E-09	4394,95239	4394,95239	4394,95239	4394,95239	4394,95239
28	-10,836172	-9,72E-08	-8,09E-07	4,16E-16	-2,19E-14	-12373,72	-12373,72	-12373,72	-12373,72	-12373,72
29	-11,83617	-12,00231	12,0023183	-3,02E-12	-1,37E-10	6147,51306	6147,51306	6147,51306	6147,51306	6147,51306
30	-9,588232	11,00232	-11,0023202	3,02E-12	1,37E-10	5968,38514	5968,38514	5968,38514	5968,38514	5968,38514
31	8,58823216	-3,98E-06	1,07E-06	-1,27E-16	-2,76E-15	15796,8394	15796,8394	15796,8394	15796,8394	15796,8394
32	-1,000007	-1,000005	8,53E-12	9,97E-15	-1,19E-14	-18332,53	-18332,53	-18332,53	-18332,53	-18332,53
33	1,000008	-0,002643	-8,10E-09	8,61E-09	-9,89E-09	-4503,036	-4503,036	-4503,036	-4503,036	-4503,036
34	1,000003	0,001273	4,06E-09	-4,31E-09	4,95E-09	-4505,945	-4505,945	-4505,945	-4505,945	-4505,945
35	-26,43921	-0,001372	-4,04E-09	4,30E-09	-4,95E-09	4505,9284	4505,9284	4505,9284	4505,9284	4505,9284

Si los datos de entrada y salida en el Simulink corresponden con los del archivo, se genera el código SCL a través de NNET de la red neuronal Simulink, en la Figura 17 se selecciona Generated Files, Simulink_nftool_2.scl para que exporte el código a un archivo txt para grabarlo e ingresarlo al programa del PLC.

3.5 Sistema automatizado

El sistema automatizado está conformado por un medidor PAC3200, el PLC S7-1200 y la interfaz Ethernet que opera a través de los protocolos SEAbus TCP o Modbus TCP por lo que la conexión se realiza de forma directa entre los equipos o por medio de una red LAN, para la integración del sistema mediante una red LAN con un switch de comunicación y el protocolo Modbus TCP para poder conectar el portátil personal, con el fin, de poder hacer gestión al sistema como se muestra en la Figura 18.

En la Figura 19 se presenta el diagrama unifilar de la conexión eléctrica de control y potencia del sistema, donde se observa la conexión de los condensadores a través de los contactores que son controlados por las salidas del PLC, también la conexión de los contactos auxiliares conectados en paralelo para que el PLC pueda contar las operaciones de los contactores.


```

C:\Users\Leonardo\Documents\MATLAB\plcsrc\simulink_nftool_2\simulink_nftool_2.scl
EDITOR
VIEW
Find Files
Insert
Save
Print
Compare
Go To
Comment
Breakpoints
New
Open
Save
Print
Compare
Go To
Comment
Breakpoints
1 (*
2 *
3 * File
4 *
5 *
6 *
7 * Model name : simulink_nftool_2
8 * Model version : 1.4
9 * Model creator : Miguel Peña
10 * Model last modified by : Miguel Peña
11 * Model last modified on : Sat Oct 03 19:03:35 2020
12 * Model sample time : 0s
13 * Subsystem name : simulink_nftool_2/Function Fitting Neural Network1
14 * Subsystem sample time : 1s
15 * Simulink PLC Coder version : 3.2 (R2020a) 18-Nov-2019
16 * ST code generated on : Mon Nov 09 22:24:52 2020
17 *
18 * Target IDE selection : Siemens TIA Portal
19 * Test Bench included : No
20 *
21 *)
22 FUNCTION_BLOCK Functio0
23 VAR_INPUT
24 Input: ARRAY [0..2] OF REAL;
25 END_VAR
26 VAR_OUTPUT
27 Output: REAL;
28 END_VAR
29 VAR
30 IW211 Value: ARRAY [0..9] OF REAL := [-0.23012322117355083,-0.034809587853894111,-1.8700998360613696,3.1640990312658863,
31 -0.01405490608556869,-0.53241722182855755,-0.30144739326187014,0.0008413096543895212,0.0061320677974260676,-0.08212561301538514];

```

Figura 17. Exportar Código SCL



Figura 18. Esquema de conexión Red Neuronal

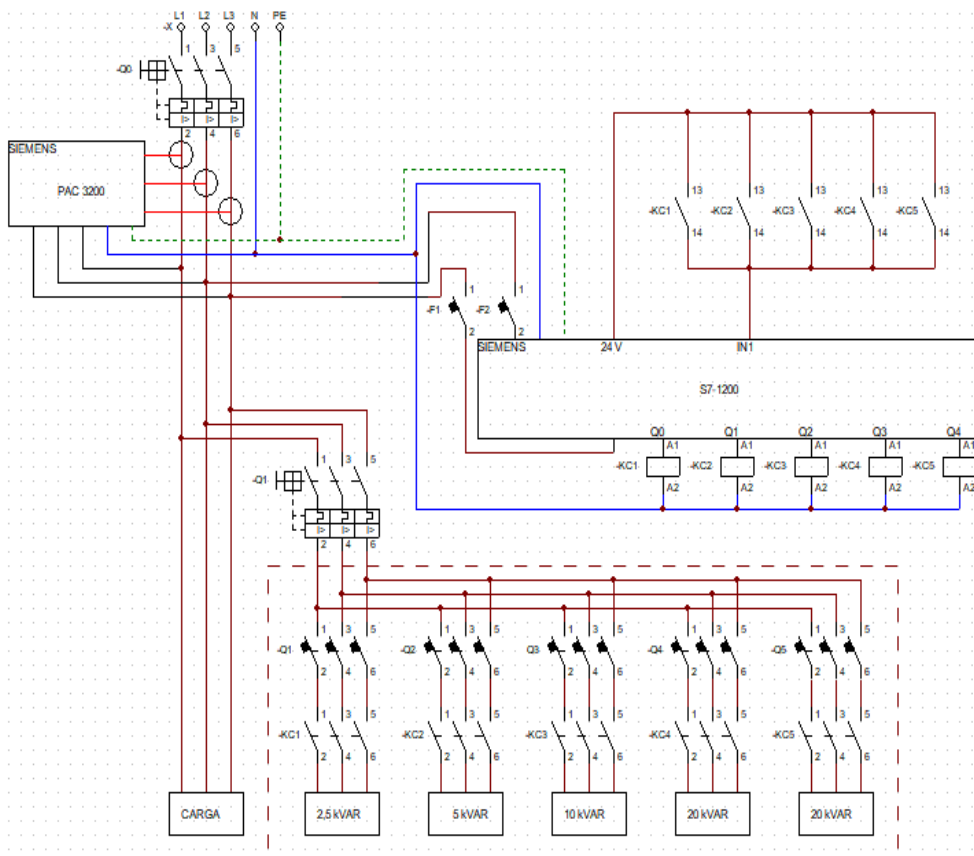


Figura 19. Esquema eléctrico

3.6 Análisis de funcionamiento

Para la integración del sistema los dispositivos cuentan con el protocolo Modbus TCP/IP, los cuales se conectan a través de una red local Ethernet para transportar los datos, la comunicación se realiza con la técnica Maestro – Esclavo, donde el dispositivo Maestro que es el PLC Siemens S7-1200 el cual inicia las consultas, mientras el dispositivo Esclavo PAC3200 procesa la información y la envía por la red local, a cada dispositivo se le debe asignar una dirección IP y una máscara de red que los identifica dentro de la red.

El PLC llama la variable que se desea consultar del medidor PAC3200 a través de una memoria, el bloque de la red neuronal lee esta información y realiza el diagnóstico de que salidas se deben colocar en 1, las salidas de la red neuronal que pasaron de cero a uno, activa la salida del PLC si cumple las condiciones establecidas para que pueda operar, las salidas del PLC que se encendieron conectan los condensadores al barraje principal por medio de unos contactores y de esta manera se corrige el factor de potencia de la subestación 2 como se puede observar en la Figura 20.

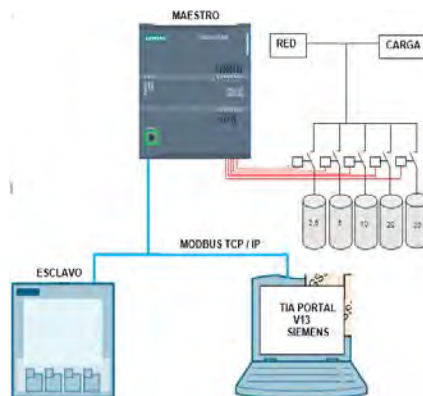


Figura 20. Integración del sistema

En la Figura 21 se muestra el sistema instalado (PLC, Medidor PAC3200, Condensadores), se conecta el analizador de redes FLUKE 435 al barraje principal para registrar las variables eléctricas de la subestación 2 con el nuevo control de corrección de factor de potencia de la red neuronal a través del PLC Siemens S7-1200, el comportamiento de la tendencia del factor de potencia durante el registro indica que tan efectivo es el funcionamiento de la red neuronal en la operación de los contactores.

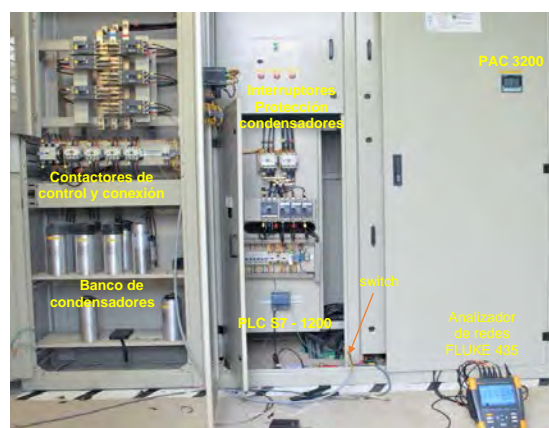


Figura 21. Montaje físico Sistema

Para la puesta en funcionamiento del sistema se desconectaron las bobinas de los contactores del corrector automático de factor de potencia para conectarlas a las salidas del PLC, el contacto auxiliar normalmente abierto de los contactores se conecta en paralelo a la entrada 1 del PLC para poder contar las operaciones de los contactores y bloquear la operación de las salidas del PLC cuando se presente resonancias en el sistema, se cambiaron dos condensadores de 10 kVAR del banco existente por uno de 2,5 y el otro de 5 kVAR para el ajuste fino de la compensación, para facilitar la visualización del funcionamiento del sistema desde el TIA Portal se implementó una red a través de un switch de 5 puertos Ethernet.

Una vez instalado el sistema automatizado se inicia un nuevo registro con el analizador redes FLUKE 435, como se muestra en la Figura 22, destacando que la tendencia del factor de potencia se encuentra dentro del rango de 0,9 y 1 en los diferentes niveles de carga, aunque hubo oscilación en el registro del factor de potencia, esta no fue ocasionada por mal funcionamiento de la red neuronal, la produjo la disminución de la carga de la Subestación #2 que elevó la tensión de la red, lo que aumentaron los armónicos de corriente en ese periodo de tiempo, sin embargo, el factor de potencia se mantuvo entre 0,9 y 1, con lo cual se comprueba la efectividad de la red neuronal para corregir el factor de potencia sobre el controlador YUNCHANG existente en la subestación 2.

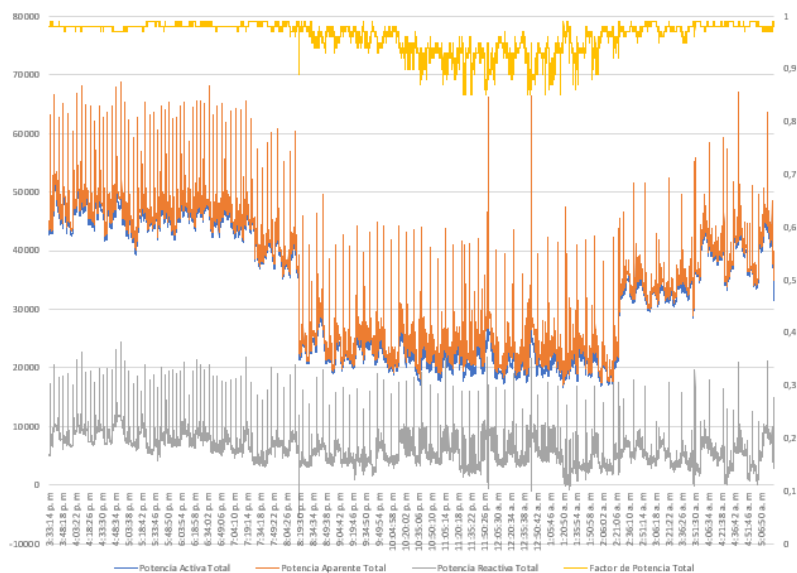


Figura 22. Montaje físico Sistema

4. CONCLUSIONES

Los sistemas industriales con alta potencia reactiva presentan efectos y consecuencias que afectan las instalaciones internas del usuario y los sistemas de suministro, como la red de distribución local, nacional y el control de frecuencia y tensión por parte del Centro Nacional de Despacho. Las técnicas de corrección de factor de potencia, permiten obtener ventajas y desventajas relacionadas con la calidad de la energía, los costos de distribución, la inversión en infraestructura para aumentar la capacidad de la red y las instalaciones.

Los datos de registro de las variables eléctricas, tales como, voltaje, corriente, factor de potencia, potencia, activa y reactiva se obtuvieron mediante el analizador de redes, los cuales fueron graficados y analizados para clasificarlos en mínimos, promedio y máximos, con los cuales se obtienen los bancos de condensadores necesarios para disminuir la potencia reactiva. Esa representa la base de datos necesaria para crear la RNA requerida.

El modelo de la red neuronal fue basado en la arquitectura de Perceptron multicapa de alimentación directa de dos capas donde la primera capa está conformada por una entrada y 35 neuronas ocultas y una función de activación tangencial sigmoideal y la segunda capa está conformada por 5 capas ocultas en la salida y una función de activación lineal, el sistema automatizado está conformado por un programador lógico programable PLC y un analizador de red que se integran físicamente mediante una red local por medio de un switch vía puerto ethernet con configuración IP, con el fin de visualizar, monitorear y evaluar en tiempo real el accionamiento del sistema en general.

El funcionamiento del sistema automatizado se validó realizando pruebas de funcionamiento de los condensadores con respecto al comportamiento de la carga, mediante la implementación de la red neuronal en un PLC. Los resultados son adecuados, la red neuronal operó correctamente a través del PLC, el analizador de Red y los condensadores mantuvieron el factor de potencia por encima de 0,97, a excepción de cuando aumentaron los armónicos de corriente, sin embargo, se mantuvo por encima de 0,9.

REFERENCIAS

- [1] UPME. (2019). Plan Energético Nacional 2020-2050. Unidad de Planeación Minero Energética.
- [2] IEEE. (2003). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. IEC 61000-4-30:2003.
- [3] Rodríguez H. et al. (2019). Mejoramiento de la calidad de energía mediante un dispositivo de energía regulable. Revista Iberoamericana de Ciencias 6(5), 89-98.
- [4] ABB. (2018). Cuaderno de aplicaciones técnicas No. 8 - Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas. Asea Brown Boveri. Zúrich, Suiza.
- [5] Aguila A. et al. (2018). Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review Heliyon 4(e00746), 1-30.
- [6] Rabosky D. y Sen P. (2014). Optimization techniques for improved power factor and energy efficiency for batch industrial processes. En IEEE Industry Application Society Annual Meeting.
- [7] Garza C. et al. (2014). Corrección del factor de potencia con banco de capacitores distribuidos en la industria maquiladora. En Ramos M. y Aguilera V. (eds.), Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Handbook.
- [8] Widjonarko W. et al. (2020). Capacitor bank controller using artificial neural network with closed-loop system. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics 9(4), 1379-1386.
- [9] CREG. (2018). Distribución de Energía Eléctrica Metodología de Remuneración de 2018-2022. CREG – 010. Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- [10] Salaan C. y Estoperez N. (2011). An artificial neural network based real-time reactive power controller. En World Congress on Engineering and Computer Science.
- [11] Pingale S. et al. (2020). PLC Based Automatic Power Factor Correction for MCB Manufacturing Plant. International Research Journal of Engineering and Technology 7(6), 3157-3161.
- [12] Rodríguez A. (2010). Gestión del flujo de potencia reactiva. CREG gestión de reactivos.
- [13] Pulsara J. (2008). Diseño de un control automático para corrección de factor de potencia. Trabajo de grado. Universidad Autónoma de Occidente.
- [14] Higuera J. (2019). Elaboración de una aplicación para la selección de componentes eléctricos usados para la conformación de un banco de condensadores automático para la corrección del factor de potencia para la empresa DISPROEL. Trabajo de grado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Diseño y construcción de órtesis para alivio de cargas en la articulación de rodilla para ciclistas

Duván Andrés Orjuela Santos¹

Yolanda Torres Pérez²

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

En la práctica de ciclismo hay momentos en los que los deportistas realizan sobreesfuerzos que se reflejan en las articulaciones, principalmente en las rodillas y los tobillos. Con la repetitividad de estas prácticas en el tiempo se generan lesiones en las estructuras del sistema musculoesquelético: músculos, huesos, tendones, ligamentos, cartílagos. En este capítulo se propone el diseño y construcción de un prototipo personalizado de órtesis para ciclistas, con el fin de disminuir las sobrecargas en rodilla y tobillo durante los entrenamientos y las competencias. Para el diseño del concepto de la órtesis se aplicó la metodología de diseño asado en el usuario, donde se tomaron medidas antropométricas y se identificaron necesidades de usabilidad y funcionalidad. Posteriormente, se realizaron cálculos estructurales, una simulación por elementos finitos, una selección de materiales y procesos de manufactura. Para la manufactura del prototipo se usaron moldes de yeso a partir de la fisiología del ciclista, fibra de vidrio y amortiguadores, rodamientos, entre otros elementos, y se ensambló el dispositivo. Se obtuvo un resultado favorable al cumplir los requerimientos de ergonomía, adaptabilidad, resistencia mecánica y alivio en la práctica de ciclismo. De igual forma, se logró solucionar un importante punto para la práctica de ciclismo: dar estabilidad en la articulación del tobillo que alteraría el pivote distal de la cadena cinemática del miembro inferior.

¹ Ingeniero Electromecánico.

Contacto: duvan.orjuela@uptc.edu.co

² Ingeniera Mecánica, Magíster en Ingeniería y Estudiante de Doctorado en Ingeniería.

Contacto: yolanda.torres01@uptc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El estudio en el ámbito de las órtesis de rodilla y miembros inferiores tiene alto abordaje en muchos países y en regiones en vía de desarrollo. Le han dado varios enfoques según su servicio, algunos usuarios lo usan como tratamiento postquirúrgico, rehabilitación, capacidades reducidas o como herramienta para mejorar su calidad de vida u rendimiento atlético, además hay usuarios que buscan usar una órtesis como complemento de ayuda en competencias de ciclismo [1]. Estos requerimientos llamaron nuestra atención y enfoque para atender las necesidades de los deportistas mediante diseños personalizados.

El gran avance se dio cuando se incluyeron los deportistas con discapacidades en las olimpiadas de verano de Seúl en 1988, y les permitieron el uso de prótesis para mejorar su desempeño. De ahí en adelante se ha hecho mucha investigación en formas, materiales y con la aparición del CAD se han desarrollado hasta el punto de hacerlo personalizado, además según su uso, los atletas de alto rendimiento les fabrican una prótesis específica para el deporte que practica y otra para su cotidianidad. Se han dado avances muy grandes que algunos deportistas han superado los récords de los atletas convencionales. En la rama biomecánica el control micro eléctrico tiene mucho énfasis. Se usan diferentes circuitos y sensores eléctricos para controlar los movimientos de una prótesis con el fin de lograr un movimiento más natural [1, 2].

El E-MAG Active de Ottobock ha sido desarrollado para usuarios que, debido a una parálisis parcial o a un fallo completo de los músculos extensores de la rodilla, son incapaces de estabilizar su rodilla sin asistencia, Incluso los usuarios que no tienen funcionalidad del tobillo en absoluto. Un sistema de sensor inteligente mide la posición de la pierna al caminar y controla la articulación de la órtesis según corresponda. Esto significa que la articulación de rodilla se abre automáticamente al caminar; se bloquea en la fase de apoyo para una asistencia segura y se desbloquea en la fase de balanceo para una marcha más natural [3].

El E-MAG Active tiene un mecanismo controlado electrónicamente que realiza los movimientos naturales de la rodilla, además tiene la función de modo desbloqueado usando un pequeño botón, puede incluso practicar el ciclismo, por ejemplo, en una bicicleta terapéutica. También es posible hacer otras actividades deportivas como la escalada gracias a la unidad de control inteligente de la articulación.

La articulación de la rodilla está sometida a diferentes tipos de esfuerzo y es aquella que tiene mayor movimiento en el desarrollo de las actividades diarias [4, 5]. El desgaste generado a diario, el sobre esfuerzo acumulado por los años produce dolor restringiendo la capacidad de realizar las actividades cotidianas. Además, los deportistas de alto rendimiento no tienen una herramienta que les ayude a prolongar su tiempo para participar en competencias o prevenir el desgaste causado por el requerimiento [6, 7]. El objetivo es desarrollar un prototipo de órtesis para el alivio de carga y sobre esfuerzos en la articulación de la rodilla, considerando la adaptabilidad para hacer actividades lúdicas, ejercicios de rehabilitación, caminar por senderos irregulares y participación en competencias.

2. MÉTODO

Para el desarrollo de este concepto de órtesis se comenzó por la iniciativa de investigación e innovación de elaborar una herramienta para aliviar la carga a la cual se somete la articulación de la rodilla en la práctica de ciclismo (Figura 1), que esta carga y sobre esfuerzos se trasladen al pedal para evitar posibles lesiones y desgaste prematuro en la articulación.

2.1 Bocetos

En la elaboración de bocetos se plasman diferentes ideas de acuerdo a las necesidades que se han analizado para lograr nuevos desarrollos e innovación. La idea inicial es un sistema con amortiguador de aire en la parte lateral interna y externa (Figura 2).

El amortiguador se sujeta en sus extremos a un mecanismo de rotación que está alineado con la rodilla y el tobillo. debe tener una escala de ajuste donde se regule de acuerdo a la exigencia y suavidad deseada.

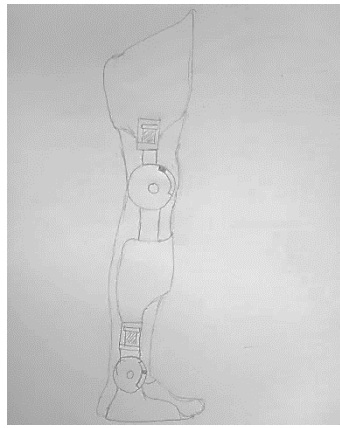


Figura 1. Concepto de órtesis

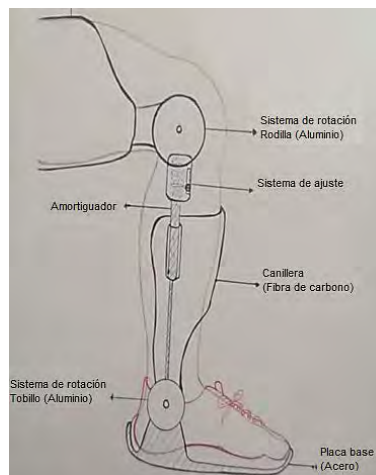


Figura 2 Vista lateral del conjunto

2.2 Encuesta

Se aplica esta encuesta con fines educativos, para obtener un análisis de las opciones descritas y tener sus opiniones de acuerdo a su criterio. El tema principal es el diseño personalizado de una órtesis de rodilla para el alivio de sobre esfuerzos e impacto y evitar lesiones en la articulación de rodilla durante la práctica de ciclismo.

1. ¿Durante la práctica de ciclismo siente alguna molestia en sus rodillas y tobillos? Nada 0, Muy fuerte 10.
2. ¿Por qué motivo la usaría una órtesis? Marca una
 - Alivio de impacto y sobre esfuerzos
 - Mejorar mi rendimiento
 - Porque tengo una lesión
 - Es una herramienta o accesorio
 - Otro:
3. ¿Qué uso le daría a la órtesis? Marca una
 - Recreativo
 - Intermedio
 - Competencia
 - Ultra fondo
 - Otro:
4. ¿Según su condición de uso debe ser? Marca una
 - fija
 - Ajustable

- Tener partes intercambiables
 - Otro:
5. ¿Según la calidad del material le gustaría?
- Escala 0-10
 - Robusta y fuerte 0
 - Esbelta y delicada 10
6. ¿Según el precio que le conviene?
- Escala 0-10
 - Pesado y barato 0
 - Liviano y costoso 10
7. ¿Según el motivo por el cual usa una órtesis, esta debe adaptarse? *
- Intercambiando componentes (precio bajo y es robusto)
 - Ajuste manual (precio intermedio, susceptible a errores)
 - Auto ajustable (precio alto y delicado)
 - Otro:
8. ¿Para la práctica de su ejercicio de acuerdo a la relación precio - estética prefiere?
- Escala de 0-10
 - Bajo precio poca estética 0
 - Alto precio, muy estética y esbelta 10

2.3 Árbol de problemas

El problema principal al que está expuesto un ciclista durante su ejercicio es el desgaste prematuro de su articulación de rodilla, se analizan algunos inconvenientes que pueda tener una órtesis (Figura 3).

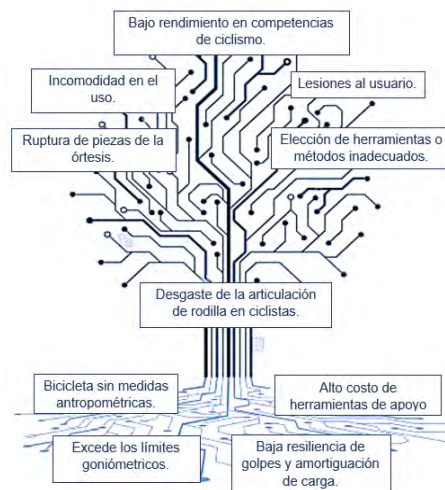


Figura 3 Árbol de problemas

2.4 Árbol de objetivos

Este esquema muestra las variables fundamentales que requiere el cliente para lograr realizar su deporte con más confianza y asegurando que va a tener una respuesta favorable de la órtesis (Figura 4).

2.5 Casa de Calidad

A través, del despliegue de la función de calidad - QFD (Quality Function Deployment por sus siglas en inglés). Se correlacionan las necesidades expresadas por el cliente vs los requerimientos de diseño de la órtesis (Figura 5).

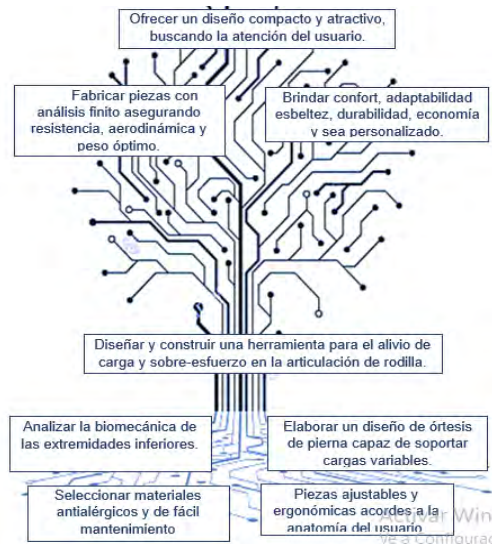


Figura 4 Árbol objetivos

		Parámetros de Técnicos															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
RELACION Necesidades vs procesos; fuerte=9, media=3, ligera=1, no hay=0		costo	condicion de usuario				condicion de uso					tipo de componentes					
		6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	
No	Requisitos del Calidad Nivel 2	Peso Ponderado	Costo \$\$	afectacion del usuario (n.i.a)*	tratamiento de lesion (s/no)	medidas gonimetricas (mm)	desempeno del ciclista (0,1,2,3)**	peso de la ortesis (Kg)	elasticidad de amortiguador (N/m)	carga inicial (kg)	ajuste de amortiguador (mm)	nivel de ajuste a pierna (1,2,3)	carga de impacto (N)	espesor de material (mm)	tamaño total (mls)	cantidad de piezas (#)	material interno (a,b,c)**
1	fibras moldeables	6,25	9		3	1	3	3	1	3	1	9	1	9	3	1	3
2	accesorios herrajería certificados	6,25	3		3	1	1	9	9	3	9	9	9	1	1	9	1
3	materiales livianos	6,25	3		9	1	9	9	1	1	1	1	1	9	9	9	9
4	materiales antialérgicos	6,25	3	1	3	1	1	1				1		1	1	1	9
5	Resistente	6,25	3		9	3	9	9	3	9	9	3	9	9	3	9	9
6	Buen acabado	6,25			9	3	3	3	1	1	1	9	1	9	3	1	9
7	relacion precisa	6,25	3		9	9	3	1	3		9	1	3	1	1	9	3
8	no restrinja movimientos	6,25	1		3		3	1	3	1	3	3	3	9	9	9	9
9	adaptable al tipo de bicicleta	6,25	3		3	3	9	3	1	1	3	1	9	1	3	3	
10	facil adquisicion y precio justo	6,25	9		3	1	3	1	1							1	
11	aerodinamico	6,25	3		1	3	9	3	1	1	1	3	1	9	9	3	
12	estetico	6,25	1		3	1	3	1	1		1	1		9	3	3	1
13	ergonomico	6,25		3	9	9	9	3	9	1	3	9	1	3	3	3	9
14	modular	6,25	9	1	3	3	9	9	1		1	1	3	1	9	9	1
15	ventilado	6,25	1		9	1	9	3				3		9	9	3	9
16	personalizado	6,25	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
sumatoria de relaciones			60	14	88	49	92	68	44	30	51	63	50	89	75	82	81
	936	Importancia técnica absoluta y relativa	6,4	1,5	9,4	5,2	9,8	7,3	4,7	3,2	5,4	6,7	5,3	9,5	8,0	8,8	8,7
			6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%

Figura 5. Casa de calidad

2.6 Diseño mecánico de la órtesis

2.6.1 Análisis dinámico de fuerzas

En el estudio de fuerzas aplicadas sobre la bicicleta para generar avance, se tienen en cuenta el plato y el piñón. El caso más crítico donde se genera mayor esfuerzo es la relación de mayor avance, plato con mayor número de dientes vs el piñón de menor número de dientes con un cambio repentino de movimiento [9]. Para analizar la fuerza que se realiza durante el pedaleo de una bicicleta, se estudia la posición del pie y la magnitud de la fuerza respecto al eje del plato (Figura 6).

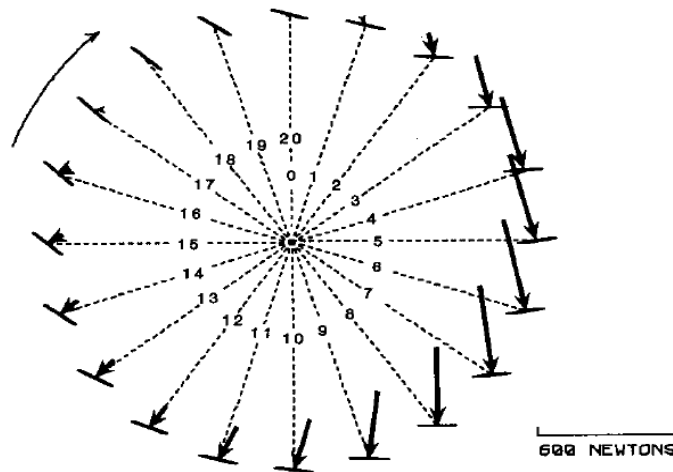


Figura 6. Diagrama de reloj de las fuerzas sobre el pedal

La fuerza aplicada por el pie sobre el pedal partiendo de consideraciones en la que el usuario va a ejercer la mayor fuerza [10]. Se toman unas condiciones iniciales de estudio dinámico, la bicicleta será de acero (15 kg), la combinación de plato-piñón 48-14 respectivamente, una longitud de biela estándar (17 cm) y llantas de uso general (70 cm de diámetro), el usuario a quien se le va a fabricar la órtesis tiene un peso de 61 Kg (Figura 7).

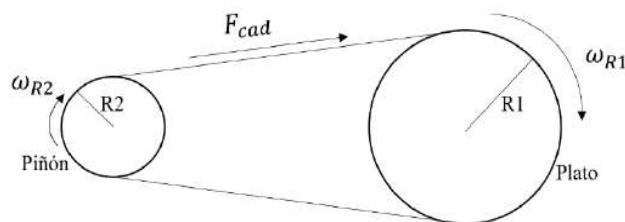


Figura 7. Momento de giro de un sistema de cadena de bicicleta

2.6.2 Análisis cinemático

Se analiza el conjunto como un mecanismo de transmisión de potencia por medio de cadena, el plato es el engrane conductor donde se aplica el torque externo y el piñón será el engrane conducido que transmite la potencia generando tracción en la rueda trasera de la bicicleta y así generar movimiento, la relación de transmisión está dada por la ecuación (1).

$$R_{\text{plato/piñon}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

$$R_{\text{plato/piñon}} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{7.65}{2.23} = 3.43$$

El momento de inercia de la rueda se expresa con la ecuación (2).

$$I = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (R_2^2 + R_u^2) = Fr \quad (2)$$

Consideraremos que la masa total M = (peso bicicleta + peso usuario) se concentra en la rueda trasera donde se aplica la potencia expresada como fuerza de rozamiento (ecuación (3)).

$$Fr = \frac{1}{2}(77)[(2.22 \times 10^{-3})^2 + (0.35^2)] = 4.7N \quad (3)$$

Con una velocidad promedio de 12km/h se tiene una velocidad desde la ecuación (4).

$$v = 3.3m/s \quad (4)$$

Donde la velocidad de la rueda se calcula con la ecuación (5).

$$\omega_{R1} = 157.4^\circ/s \quad (5)$$

Donde α_{ll} es la aceleración angular de la rueda (ecuación (6)).

$$\alpha_{ll} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\alpha_{ll} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{540 - 157.4}{40s} = 9.5m/s^2$$

Entonces, el torque está dado por la ecuación (7).

$$\tau = 4.7(9.5) = 44.65 Nm \quad (7)$$

La fuerza ejercida a la cadena se calcula con la ecuación (8).

$$F_{cad} = \frac{\frac{1}{2}M(R_2^2 + R_{ll}^2)\alpha_{ll} + (Fr \cdot R_{ll})}{R_2} \quad (8)$$

$$F_{cad} = 737.8N$$

En la Figura 8 se presenta la representación gráfica del conjunto cinemático.

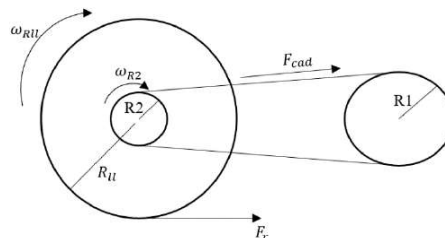


Figura 8. Conjunto cinemático

La fuerza aplicada en la biela se calcula con la ecuación (9).

$$F_{pie} \cdot l_{biela} = F_{cad} \cdot R_1 \quad (9)$$

$$F_{pie} = \frac{737.8(0.00765)}{0.17} = 33.2 N$$

En la Figura 9 se observa la aplicación de la fuerza externa transmitida a la cadena.

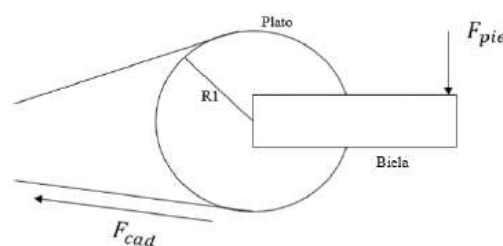


Figura 9. Conjunto de fuerzas y momentos

La fuerza requerida por el conjunto pierna-órtesis es: 33.2N. Los amortiguadores son simétricos con respecto al centro de la pieza, se considera que a cada lado se aplica $\frac{1}{2}$ de la carga total analizada en el plano sagital [11-13]. El ángulo que forman los amortiguadores con respecto al eje central de la pierna es de 2,5°. La carga aplicada sobre los rodamientos se transfiere a la muslera, concluyendo que a cada lado de la muslera se soporta [8, 14] la fuerza de la ecuación (10).

$$F_{transv} = \frac{1}{2}(F_{pie}) \cos \theta \quad (10)$$

$$F_{transv} = \frac{1}{2}(33.2N) \cos 2.5 = 16.6 N$$

2.7 Manufactura del prototipo

El prototipo es personalizado, se elaboran los moldes en yeso de acuerdo a su fisiología de cada usuario para asegurar su ajuste y ergonomía, después de elaborados los moldes se comienzan a fabricar las piezas colocando primero una capa de fibra de vidrio luego una malla de acero, y se recubre con más fibra de vidrio y resina para que quede firme y resistente para su posterior funcionamiento (Figura 10).



Figura 10. Conformado por capas de fibra de vidrio

El mecanismo de rotación se elabora con un rodamiento que es incrustado en una pieza de aluminio, y su eje es un tornillo que va en el extremo del amortiguador. La pieza de aluminio se asegura a la pieza de fibra de vidrio con tornillos. Elaboración de estribo para apoyar el pie, este transmitirá la carga desde el vástago de los amortiguadores al mecanismo de rotación y el estribo lo transmitirá al pedal (Figura 11).



Figura 11. Estribo

El ensamblado de las piezas y posterior pulido se observa en la Figura 12.

Figura 12. Ensamble de todo el conjunto

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se elaboró el diseño CAD en el software SOLID WORKS de la órtesis, teniendo en cuenta los requerimientos de diseño y las dimensiones del prototipo fabricado manualmente, considerando la mayor cantidad de variables de diseño posibles que influirían para el desempeño óptimo del dispositivo final (Figura 13).

Figura 13. Boceto final CAD

Prototipo de órtesis funcional planteada que requerían una mayor atención según los ítems de la encuesta aplicada. Órtesis final con bandas de ajuste, espuma interna y acabado total (Figura 14).

Figura 14. Prototipo final vista posterior

3.1 Validación de resultados

Se hizo el análisis de elementos finitos aplicando las fuerzas calculadas a las piezas que sujetan por los extremos el amortiguador. Además, se consideró que la muslera (Figura 15) recibe parte de la fuerza ejercida por el ciclista y la transfiere a la pieza del mecanismo de sujeción y rotación.

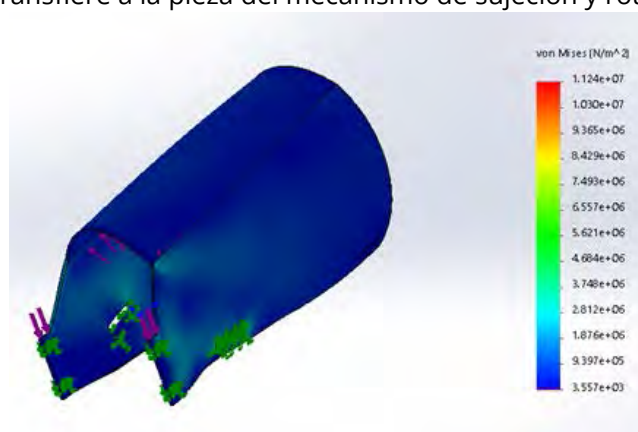


Figura 15 concentración de fuerza en la muslera

El estribo (Figura 16) recibe la fuerza total ejercida por el ciclista y la transmite al pedal para el análisis el material que se analiza es resina de poliéster.

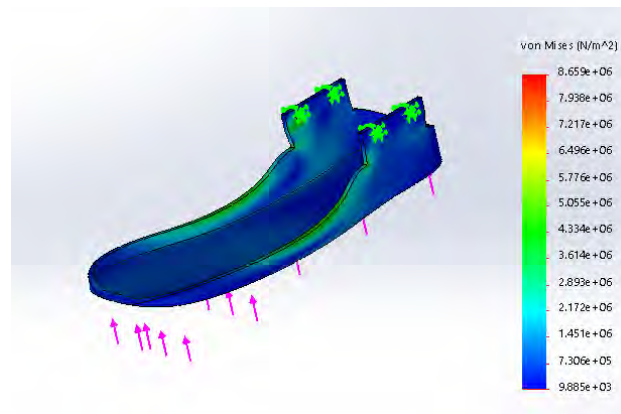


Figura 16. fuerza del pedal hacia el estribo

Se realizó una prueba al prototipo de órtesis personalizada, el usuario la utilizó en las condiciones más críticas donde aplicaba la fuerza máxima para generar el impulso, la órtesis resistió el esfuerzo al cual se sometió y superó las expectativas de su utilidad. Inicialmente el usuario se coloca la órtesis y ase el ajuste que cree necesario para que le quede fija a la pierna y logre cumplir la función que se requiere. La flexión máxima se da cuando el ciclista está sentado en el sillín y el pedal está en la parte superior respecto al eje de rotación.

La extensión máxima se da cuando el ciclista está parado en los pedales y el pedal está en la parte más baja. La fuerza máxima se aplica en el instante cuando la posición del pedal está entre los 0 y -10° respecto de su eje de rotación medidos en sentido contrario a las manecillas del reloj partiendo de la horizontal.

La órtesis reduce las cargas en las articulaciones de rodilla y tobillo, pero se transmiten en menor proporción al muslo. Es necesario disminuir el peso de las piezas, ya que el prototipo tiene un peso final de 1.135 kg, lo que afecta el rendimiento del usuario [15, 16].

El análisis por elementos finitos muestra una concentración de esfuerzos en los tornillos que sujetan la pieza del mecanismo de rotación, por lo cual estos apoyos se deben fabricar incrustados en la musculera y estribo, para evitar sobreesfuerzos o deformaciones que afecten el adecuado funcionamiento de la órtesis en condiciones reales de carga durante entrenamientos o competencia de los ciclistas.

4. CONCLUSIONES

En el diseño y manufactura de este tipo de ayudas técnicas para el deporte es fundamental contar con la opinión y experiencia de los deportistas (ciclistas) ya que son ellos los que pueden identificar claramente cuáles son los requerimientos funcionales, de usabilidad y hasta cierto punto técnicos, que debe cumplir la órtesis para que sea lo más funcional posible, logrando así un mejor rendimiento del deportista.

El prototipo de órtesis diseñado y construido cumplió con los requerimientos que más relevancia tenían en el análisis de diseño, cumple las condiciones máximas de trabajo y el alivio de carga en las articulaciones cuando se está realizando entrenamientos en la bicicleta.

Con el diseño y construcción de este modelo de órtesis funcional se brinda una solución oportuna a los requerimientos de distribución o disminución de carga, así como de estabilidad lateral en las articulaciones de rodilla y tobillo que afectan a los deportistas durante la práctica del ciclismo.

Esta órtesis, además, puede ayudar a mejorar el control en la articulación del tobillo que altera el pivote distal de la cadena cinemática del miembro inferior el cual influye en la efectividad del movimiento del pedaleo de los ciclistas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a quien dirige el curso de electiva Llamado: Diseño Electromecánico Aplicado a Bioingeniería ofrecido por la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, a los compañeros del curso por sus aportes en el proceso de diseño y retroalimentación al proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Castellano J. et al. (2019). Ingeniería Biomédica. Universidad IEA.
- [2] Faúndez C. (2007). Intereses económicos y sociales que rodean el ciclismo de competencia. *Presentaciones, Periodismo, Comunicación y Sociedad* 3, 167–183.
- [3] de Waard D. (2017). Cycling futures. *Transport Reviews* 37(3), 403–405.
- [4] Charpentier A. (2015). La lucha ha de ser a muerte (y por puro prestigio). Reflexiones sobre la competencia deportiva femenina. *Revista de investigación y divulgación sobre los estudios de género* 22(17), 75–101.
- [5] Carpes F. et al. (2006). Pedaling kinematics characteristics of competitive cyclists of different disciplines. *Portuguese Journal of Sport Sciences* 6(1), 7–14.
- [6] Bini R. et al. (2010). Fatigue effects on the coordinative pattern during cycling: Kinetics and kinematics evaluation. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 20(1), 102–107.
- [7] Rassier D. et al. (1999). Length dependence of active force production in skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology* 86(5), 1445–1457.
- [8] Hamill J. y Knutzen K. (2015). Biomechanical basis of human movement. Wolters Kluwer Health.
- [9] Tashiro Y. et al. (2016). Body characteristics of professional japanese keirin cyclists: Flexibility, pelvic tilt, and muscle strength. *Journal of Sports Science* 4, 341–345.
- [10] Perez J. et al. (2002). Physiological differences and rating of perceived exertion (RPE) in professional, amateur and young cyclists. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 42(4), 389–395.
- [11] Bini R. et al. (2011). Effects of bicycle saddle height on knee injury risk and cycling performance. *Sports Medicine* 41(6), 463–476.
- [12] Tamborindeguy A. y Bini R. (2011). Does saddle height affect patellofemoral and tibiofemoral forces during bicycling for rehabilitation? *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 15(2), 186–191.
- [13] Bini R. et al. (2014). Saddle height effects on pedal forces, joint mechanical work and kinematics of cyclists and triathletes. *European Journal of Sport Science* 14(1), 44–52.
- [14] Sanderson D. et al. (2014). Gastrocnemius and soleus muscle length, velocity, and EMG responses to changes in pedalling cadence. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 16(6), 642–649.
- [15] Zemková E. (2018). Sport-specific balance. *Sports Medicine* 44,5, 579–590.
- [16] Hrysmallis C. (2011). Balance ability and athletic performance. *Sports Medicine* 41(3), 221–232.
- [17] González J. y García J. (2019). Trastornos del lenguaje y la comunicación. En Congreso de Actualización Pediatría. Madrid, España.

Generación de un modelo predictivo de la fuerza de agarre para trabajadores del sector panelero

Yulieth Tatiana Delgado Guzmán¹

Jorge Yaith Arroyo Madera²

Magda Viviana Monroy Silva³

Christian Ricardo Zea Forero⁴

¹⁻³ *Universidad Santo Tomás*

⁴ *Pontificia Universidad Javeriana*

Colombia

La fuerza de agarre se entiende como la fuerza manual que posee una persona, además de ser un determinante para contraer lesiones en el sistema osteomuscular e incluso provocar la muerte. El propósito de esta investigación es realizar un análisis de los factores personales que influyen en la fuerza de agarre de los trabajadores del sector panelero de Caparrapí, Colombia. El modelo predictivo permitirá conocer la fuerza máxima de agarre que tiene el trabajador y así evitar sobreesfuerzos que provoquen traumas musculoesqueléticos. Esta investigación se llevó a cabo utilizando un método combinado de entrevistas, consultas, toma de datos y observación a los trabajadores pertenecientes a la Asociación de alimentos paneleros de Caparrapí, además de apoyarse en una revisión de la literatura relacionada. También se hizo uso de estadística descriptiva para crear el nuevo modelo predictivo de la fuerza de agarre. Los trabajadores paneleros realizan actividades laborales durante seis días a la semana, de lunes a jueves trabajan fuera de la enramada, es decir, en el corte de caña, y los viernes y sábados realizan las actividades dentro de la enramada. Las variables más influyentes en la fuerza de agarre de los trabajadores paneleros de Caparrapí son la talla, el peso y la edad. La fuerza máxima de agarre de esta población aumenta hasta llegar a los 32 años, cuando presentan la mayor fuerza de agarre registrada en promedio; a partir de los 33 años se observó que este valor empieza a disminuir significativamente a medida que la edad aumenta. Además, basta con un único modelo predictivo de la fuerza de agarre para ambas manos de los trabajadores.

¹ Estudiante de Ingeniería industrial.

Contacto: yulithdelgado@usantotomas.edu.co

² Estudiante de Ingeniería industrial.

Contacto: jorgearroyo@usantotomas.edu.co

³ Magíster en Ingeniería Industrial.

Contacto: magdamonroy@usantotomas.edu.co

⁴ Investigador.

Contacto: crzea@javeriana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La fuerza de agarre es entendida como la fuerza manual que posee una persona, además de ser un determinante para contraer enfermedades en el sistema osteomuscular e incluso provocar la muerte[1]. Los principales factores que pueden llegar a influir en esta fuerza, son la edad, el sexo y el clima[2]. Varios autores como María Villar, describen en sus artículos que actividades físicas como andar, correr o mantener peso sobre los brazos hacen que los músculos se compriman y así mismo este recibe una menor cantidad de flujo sanguíneo, al igual que nutrientes y oxígeno[3]. Es por esto que la realización de actividades laborales que requieran posturas mantenidas, movimientos repetitivos, uso de herramientas manuales que deben sostener en una sola posición, entre otras[4].

Estas actividades laborales, se pueden encontrar en distintos sectores laborales, como en las agroindustrias, por ejemplo, la agroindustria panelera es la segunda más grande de Colombia en la actualidad, encargada de producir alimentos paneleros y distribuirlos en todas las regiones, este alimento se produce mayormente en los departamentos de Santander y Cundinamarca, contando con un aproximado de 287.000 empleos directos en todo el territorio nacional [5]. La mayoría de estos empleados no cuentan con los requerimientos mínimos de seguridad y salud en el trabajo, esto debido a que este oficio en la mayoría de los casos es informal[6]. Por este motivo los planes de desarrollo se focalizan en brindarles mejor calidad de vida a los trabajadores campesinos, apoyando el sector con herramientas que faciliten el trabajo en el campo y disminuya la probabilidad de presencia de enfermedades producidas por trabajos que requieren sobreesfuerzos, como los traumas musculoesqueléticos [7].

En Cundinamarca el municipio pionero en la producción de panela es Caparrapí, este municipio cuenta con más de 16.000 habitantes, de los cuales, según información brindada por la alcaldía municipal, 6642 personas aproximadamente están empleadas por los 1107 trapiches presentes en todo el territorio municipal[8]. Estas personas trabajan 6 días a la semana en promedio, debido a que el proceso de fabricación de panela requiere esta cantidad de tiempo, (según la entrevista realizada a los paneleros) en el cual los trabajadores deben realizar las distintas actividades, como lo es el corte de caña, transporte de caña desde el corte hasta la enramada, moler la caña, cocinar el jugo, clarificar el jugo, moldear el dulce obtenido y empacar el producto final [9].

Las actividades mencionadas conllevan a realizar un esfuerzo físico, el cual podría provocar traumas musculoesqueléticos, estos traumas se definen como problemas de salud, que se presentan en el sistema locomotor de las personas al generasen rupturas o lesiones en músculos, tendones, tendones, esqueleto óseo, cartílagos, ligamentos y nervios[10]. En la realización de las actividades implícitas en el proceso, se encuentran en su mayoría hombres de diferentes edades, peso, talla, IMC (Índice de masa corporal), entre otras características personales que se presentan, por este motivo, se decide realizar un análisis de los factores personales que influyen en la fuerza de agarre de los trabajadores del sector panelero de Caparrapí Cundinamarca, este modelo predictivo permitirá conocer la fuerza máxima de agarre que tiene el trabajador y así evitar sobreesfuerzos que provoquen traumas musculoesqueléticos[11].

2. MÉTODO

Esta investigación es de tipo explicativa, cualitativa y cuantitativa, debido a la naturaleza de las variables estudiadas, lo que se buscaba es analizar los factores personales que influyen en el cálculo de la fuerza de agarre de los trabajadores del sector panelero de Caparrapí Cundinamarca. El estudio cuenta con un diseño no experimental de corte transversal debido a que se tomó una muestra representativa de trabajadores del sector panelero de Caparrapí Cundinamarca y fueron estudiados en un momento dado, donde se recolectaron los datos de interés y se procedió a realizar la valoración de las variables.

Los participantes de la presente investigación fueron 87 trabajadores vinculados a asociación pública de alimentos paneleros de Caparrapí, entre los 16 y 80 años que desempeñan actividades del sector agrario y que son en su totalidad del sexo masculino. Los criterios de inclusión que se tuvieron en cuenta comprenden no tener antecedentes de lesiones musculoesqueléticas, también el voluntario no debe

presentar algún síntoma osteomuscular en el último mes, las principales características de la población se describen en Tabla 1.

Tabla 1. Características de la población

		Participantes	Mínimo	Máximo	Promedio
Sexo	Masculino	87	N/A	N/A	N/A
	Femenino	0	N/A	N/A	N/A
Dominancia	Derecho	79	N/A	N/A	N/A
	Izquierdo	6	N/A	N/A	N/A
IMC	Ambidiestro	2	N/A	N/A	N/A
	Bajo peso	2	45	50	47,5
	Normal	52	16	80	41,03
	Moderado	27	55,6	87,8	75,41
	Obesidad I	6	92	110	99,83
Peso (Kg)		87	45	110	69,73
Talla (m)		87	1,46	1,87	1,69
Edad (años)		87	16	80	42,8

La investigación se llevó a cabo utilizando un método combinado de entrevistas, consultas, toma de datos y observación a los trabajadores paneleros del municipio de Caparrapí Cundinamarca, pertenecientes a la asociación de alimentos paneleros de Caparrapí, además de apoyarse en una revisión de literatura de artículos relacionados con el tema, obtenidos de bases de datos como, Scopus, ScienceDirect, Scielo, entre otras, teniendo como criterio de selección, título y resumen. En **Figura 1**, se describen los criterios que se debían considerar para la participación o exclusión en la investigación.

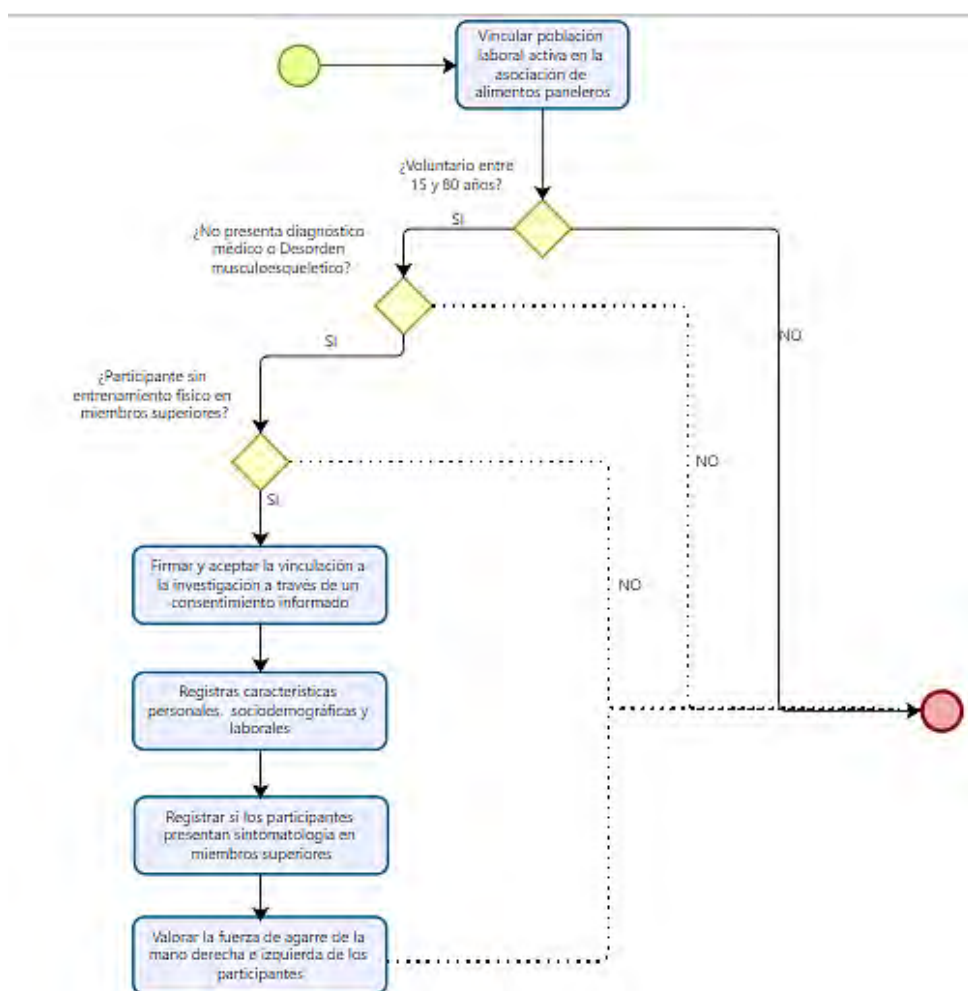


Figura 1. Criterios de inclusión

Haciendo uso del método de observación, el cual se aplicó durante 6 días de la semana, partiendo desde el lunes y en periodos de tiempo de dos horas por día y la aplicación de entrevistas.

2.1 Toma de datos a los trabajadores

Se realizó una caracterización de los factores personales que podrían llegar a influir en la fuerza de agarre de los trabajadores, donde se incluyeron preguntas relacionadas con la edad, peso, talla, Índice de masa corporal IMC y dominancia de la mano, para esto los participantes debían firmar un consentimiento informado, el cual permite el uso de datos registrados para la presente investigación.

Seguido a esto se procedió a tomar las medidas de la fuerza de agarre de mano derecha e izquierda, haciendo uso de un dinamómetro marca Jamar. Esta medición se aprobó por el comité de ética de la Pontificia Universidad Javeriana basándose en el código de ética de la asociación médica mundial (declaración de Helsinki) para experimentos con humanos, de esta forma el procedimiento que se llevó a cabo para este procedimiento fue el siguiente:

1. El participante debía estar sentado en una silla firme y el cuerpo recto, colocando el medio-brazo unido al cuerpo y el antebrazo a 90°.
2. El participante debía sostener el dinamómetro empuñando su mano y apretarlo con la mayor fuerza posible durante tres segundos.
3. Se debía repetir el mismo proceso para la otra mano, seguido a esto se volvía a realizar el ejercicio dos veces más por mano, de forma intercalada, con el fin de tener mayor precisión en la toma de datos.

2.2 Modelo predictivo de la fuerza de agarre

Se decidió verificar la viabilidad de realizar una regresión lineal múltiple para determinar el modelo predictivo, esto se realizó a través de una prueba de normalidad, graficando el histograma de los datos y para respaldar la información obtenida, se determinó una hipótesis nula y alternativa, las cuales serían aceptadas o rechazadas apoyándose en el estadístico de prueba y el valor crítico. Seguidamente se determinó el modelo predictivo de la fuerza de agarre teórico utilizando la ecuación (1).

$$\gamma = b_0 + b_1X \quad (1)$$

Donde γ , hace referencia a la variable de salida (fuerza máxima de agarre), esta variable tomará dos valores, fuerza máxima de agarre para mano derecha y para mano izquierda, b_0 , será el intercepto del modelo predictivo, b_1 , tomará el valor de los coeficientes que acompañarán X y finalmente X , serán las variables independientes que se incluirán en el nuevo modelo predictivo.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización de las actividades laborales

Al aplicar la entrevista a los trabajadores y observar cómo realizaban su trabajo durante una semana en periodos de tiempo de dos horas diarias, se logró evidenciar que todas las actividades que realizan exigen esfuerzo físico, por ejemplo de lunes a jueves se observó que los trabajadores llegaban al sector de la finca donde se debía cortar la caña a las seis de la mañana aproximadamente, al llegar allí lo primero que realizan los trabajadores es alistar las herramientas con las que van a trabajar, usualmente para el corte de caña la herramienta que usaban era un machete, al cual debían sacar filo.

Después de esto empezaban a cortar caña en orden, es decir tramo por tramo, en seguida llegaban dos o tres trabajadores más con mulas para transportar la caña hasta la enramada, este proceso se repetía todos los días hasta el jueves, para el día viernes los trabajadores que estaban cortando caña pasaban a realizar distintas tareas dentro de la enramada, mientras tanto los encargados de transportar la caña, seguían en el mismo oficio hasta pasar toda la caña del corte a la enramada.

Ya dentro de la enramada los trabajadores tomaban distintos roles, dos personas se encargaron de moler la caña usando como herramientas un motor y un trapiche, uno de ellos se encargaba de colocar toda la

caña dentro del trapiche y el otro trabajador estaba al otro costado sacando el bagazo resultante y llevándolo a su zona de almacenamiento, el jugo que salía de esta actividad iba directo a unas calderas, en las cuales era cocinado.

El encargado de cocinar el jugo de la caña, era el hornero, pues debía estar pendiente del horno donde estaban puestas las calderas, suministrando leña y bagazo seco con el fin de tenerlo activo en todo momento. También estaba la persona encargada de verificar que el jugo se cocinara correctamente a esta actividad los trabajadores la denominan *Pailear*, allí el trabajador debía estar sacando la parte más espesa del jugo y llevarla aparte para luego dar alimento a las mulas que cargaban la caña, también debía pasar el jugo una caldera más adelante cada vez que salía una *cocha*, esta salía cuando el jugo estaba bien cocinado y no se encontraba tan líquido.

Seguido a esto ese jugo ya pasaba a la gavera, donde se encontraba otro trabajador que se encargaba de verificar que todos los moldes de la gavera quedarán con la cantidad correcta del dulce de la caña, además debía esperar que este dulce alcanzara la solidificación, en seguida procedía a retirar la gavera y empaclar la panela en bolsas y cajas respectivamente, así ya quedaba listo el producto para almacenaje (Figura 2).

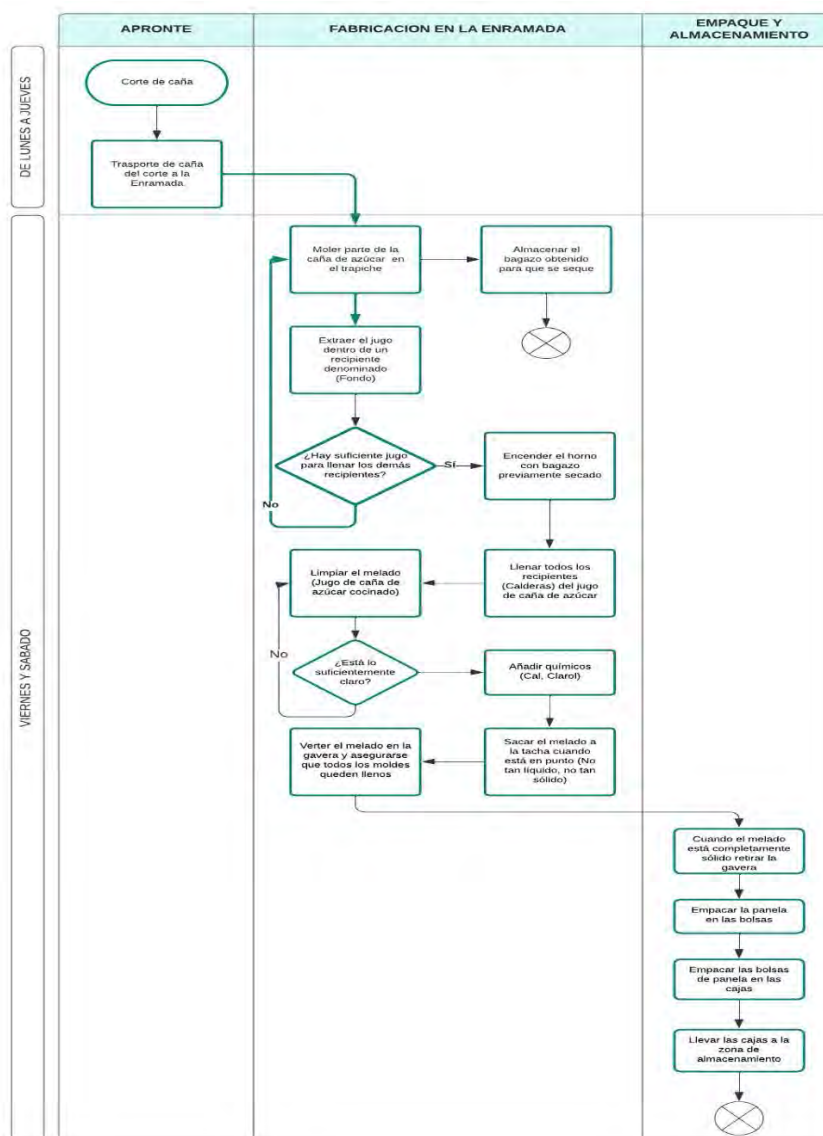


Figura 2. Diagrama de procesos - Fabricación de panela

En todas las actividades descritas se pudo observar que los trabajadores no contaban con los suficientes elementos de protección que requiere cada actividad, además de observarse que debía estar haciendo uso de su fuerza manual constantemente, incluso en varios casos estas actividades exigían sobreesfuerzo, otras requerían estar en constantes movimientos repetitivos y posturas mantenidas.

3.2 Características personales de los trabajadores

A través de la caracterización de factores personales que se les realizó a los trabajadores y la fuerza máxima de agarre medida en ambas manos, se procedió a realizar una tabla que relaciona la fuerza máxima de agarre con cada factor tanto para mano derecha como para mano izquierda. *Ver tabla 2.* Encontrando así los factores más influyentes en la fuerza máxima de agarre:

Tabla 2. Fuerza de agarre Vs variable estudiada

Fuerza máxima de agarre (KgF)	Mano Derecha					Mano Izquierda			
	No.	Min	Máx	Prom	Desv. Estándar	Min	Máx	Prom	Desv. Estándar
Población total	87	26,00	66,33	44,73	6,45	30,67	60,33	43,32	6,22
Edad									
Entre 15-18 años	3	44,66	49,33	47,11	2,34	39,33	46,66	43,55	3,79
Entre 18-24 años	14	39,00	56,60	47,02	4,91	30,66	58,33	46,61	6,78
Entre 25-32 años	10	46,33	66,30	52,40	6,44	43,30	60,30	49,80	5,36
Entre 33-40 años	12	41,60	54,60	46,93	4,45	40,33	54,33	45,36	4,48
Entre 41-48 años	16	35,60	52,00	44,60	4,13	33,60	53,60	43,30	4,89
Entre 49-56 años	12	26,00	50,60	40,55	6,02	34,30	49,00	39,90	3,41
Entre 57-64 años	12	31,30	58,60	42,06	6,73	31,30	56,00	39,80	5,97
Entre 65-72 años	7	34,60	40,60	37,04	2,20	33,00	41,16	36,35	3,19
Entre 73-80 años	1	39,33	39,33	39,33	0,00	37,67	37,67	37,67	0,00
Sexo									
Masculino	87	26,00	66,33	44,72	6,45	30,66	60,33	43,32	6,22
Femenino	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dominancia									
Derecho	79	26,00	66,33	44,71	6,67	30,66	50,33	43,30	6,35
Izquierdo	6	35,66	47,60	44,72	4,58	33,66	48,00	43,50	5,11
Ambidiestro	2	44,60	45,60	45,10	0,70	36,60	43,33	40,00	4,71
IMC									
Bajo peso	2	38,00	38,00	38,00	0,00	37,00	38,60	37,83	1,17
Normal	52	34,66	66,33	48,85	6,21	30,66	60,33	43,50	6,29
Moderado	27	34,00	54,50	45,11	5,56	33,33	54,66	43,29	5,99
Obesidad I	6	31,33	54,66	46,11	5,66	31,33	52,66	43,77	5,46
Talla									
Entre 1,46-1,53 m	2	35,66	39,33	37,50	2,59	33,66	37,66	35,66	2,82
Entre 1,54-1,61 m	11	26,00	52,66	41,84	7,55	33,00	54,60	42,15	6,90
Entre 1,62-1,69 m	32	34,66	58,66	44,27	5,46	33,33	56,00	42,73	4,83
Entre 1,70-1,77 m	34	31,33	60,66	45,53	6,18	30,66	58,33	43,36	6,61
Entre 1,78-1,85 m	6	43,33	66,33	48,98	8,69	44,66	60,33	50,11	5,41
Entre 1,86-1,93 m	2	42,66	54,66	48,66	8,48	39,33	52,66	46,00	9,42
Peso									
Entre 45-60 Kg	19	26,00	51,33	41,29	5,71	33,66	53,66	40,96	5,31
Entre 61 -75Kg	45	34,66	60,66	45,03	5,69	30,66	58,33	43,51	5,99
Entre 76-90Kg	17	34,00	66,33	47,25	7,16	34,33	60,33	45,32	6,86
Entre 91-105 Kg	5	31,33	54,66	46,80	9,69	31,33	52,66	44,66	8,39
Entre 106-120 Kg	1	42,67	42,67	42,67	0,00	39,33	39,33	39,33	0,00

- **Edad:** Para poder obtener un análisis de lo que sucede con la fuerza de agarre en relación con los años, se decide discriminar estos datos en rangos, siendo el primero de 15 a 18 años, que comprende las personas que son menores de edad y trabajan en este sector, en este grupo se tienen únicamente 3 participantes, a partir de los 18 años se generaron 8 grupos más, siendo 73 años el límite inferior del último grupo, a partir de esto se logró evidenciar que la fuerza máxima de agarre aumenta a medida que aumentan los años hasta llegar a los 32, a partir de los 33 años se pudo evidenciar que esta fuerza empieza a disminuir considerablemente.
- **Dominancia:** En esta variable se puede observar que de los trabajadores incluidos en este estudio 79 presentan dominancia derecha, 6 izquierda y 2 presentan dominancia en ambas manos (Ambidiestro).
- **IMC:** En cuanto al Índice de masa corporal, la mayor parte de la muestra se encuentra en estado normal (52 trabajadores), bajo de peso hay dos hombres, en moderado se encuentran 27 y en obesidad I 6 casos.

- **Talla:** Para este factor, se realizó el mismo procedimiento que con la edad, es decir se discriminó por grupos para poder obtener una mejor visión de la variación de la fuerza de agarre en relación a la talla, en estos valores se dividieron en 6 grupos, empezando en 1,46m y sumando 7cm para cada grupo, para tener 1,86m como límite inferior del último grupo, allí se encontró que la fuerza de agarre tanto de mano derecha como de mano izquierda, aumentan considerablemente hasta la altura de 1,85m, ya que a partir de allí empieza el último grupo y se presenta una disminución, cabe resaltar que allí solo figuran dos trabajadores por lo que podría no ser un dato considerable por la cantidad de implicados.
- **Peso:** Para este factor, los valores registrados, se agruparon en rangos de 15 Kg, empezando desde 45 Kg que fue el dato con menor valor registrado, obteniendo así 5 grupos de datos, donde se observa que la fuerza de agarre aumenta cuando el valor del peso en Kg aumenta, esto hasta llegar al antepenúltimo grupo que comprende el peso de 76 a 90 Kg, a partir de los 91 Kg se pudo observar que la fuerza de agarre en promedio para ambas manos tiende a disminuir.

3.3 Modelo predictivo de la fuerza de agarre para los trabajadores paneleros de Caparrapí

Para generar un modelo predictivo de la fuerza de agarre de los trabajadores dedicados a la producción de panela, se tuvo en cuenta las variables más incidentes en los modelos predictivos teóricos revisados, en ellos los autores describen las variables más influyentes en el cálculo de esta fuerza, las cuales fueron 6, sexo, talla, peso, IMC, edad y fuerza de agarre, las cinco primeras actúan como variables independientes, ya que son valores únicos encontrados en cada persona, por el contrario la variable fuerza de agarre se tomó como variable dependiente, puesto que según diversos investigadores, estudiados en la revisión de literatura, la fuerza de agarre puede variar dependiendo de las condiciones personales de un individuo y la mayoría de ellos coinciden que los factores que más influyen en este cálculo.

Para el planteamiento de este nuevo modelo predictivo, se decide utilizar las variables edad, peso, talla y fuerza máxima de agarre, estas se seleccionaron en base a los factores más utilizados por los distintos autores, el sexo se descarta debido a que en este estudio solo participan personas de sexo masculino, el IMC se descartó debido a que es una relación entre la talla y el peso, factores que serán incluidos en el modelo.

En este caso la variable fuerza de agarre tomará dos valores, puesto que se pretende realizar un modelo predictivo para mano derecha y otro para mano izquierda. De este modo y con los factores definidos, el siguiente paso a realizar fue determinar si las variables de salida seguían una distribución normal, para esto se decidió realizar un histograma de los datos, el primero se realizó para los datos correspondientes a la mano derecha (Figura 3).

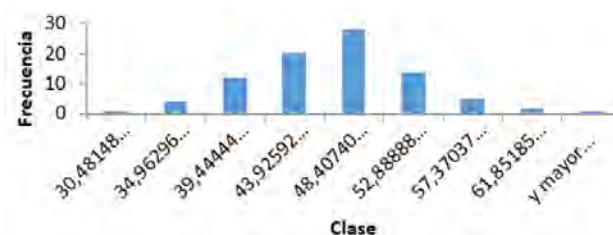


Figura 1. Histograma fuerza de agarre mano derecha

Al observar el histograma se puede decir que la mayor parte de los datos registrados se concentran en la mitad, por esto se podría decir que siguen una distribución normal, con el fin de tener mayor exactitud a la hora de afirmar esto, se decide plantear las hipótesis:

Ho: Los datos de la fuerza de agarre de la mano derecha siguen una distribución de normalidad

H1: Los datos de la fuerza de agarre de la mano derecha no siguen una distribución de normalidad

En seguida se procede a determinar el estadístico de prueba y el valor crítico, de los que se obtiene como resultados 3,99 y 15,51 respectivamente, dado que el estadístico es menor al valor crítico, se decide aceptar

la hipótesis nula que establece que los datos siguen una distribución normal y se rechaza la hipótesis alternativa (Tabla 3).

Tabla 3. Normalidad datos, fuerza de agarre-mano derecha

Estadístico de prueba	Valor Crítico
3,99405198	15,5073131

Seguidamente se realizó el mismo procedimiento para los datos registrados para la mano izquierda, graficando los datos en un histograma (Figura 4).

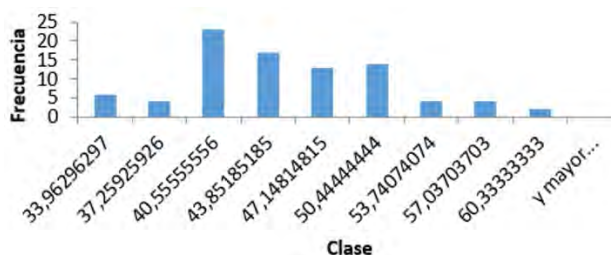


Figura 2. Histograma fuerza de agarre mano izquierda

Y las hipótesis planteadas para la prueba de normalidad de la mano izquierda son:

Ho: Los datos de la fuerza de agarre de la mano izquierda siguen una distribución de normalidad

H1: Los datos de la fuerza de agarre de la mano izquierda no siguen una distribución de normalidad

Para este caso, el estadístico de prueba es de 12,30 y el valor crítico de 15,51, por lo que de igual forma es posible aceptar la hipótesis nula que plantea que Los datos de la fuerza de agarre de la mano izquierda siguen una distribución de normalidad y así mismo rechazar la hipótesis alternativa (Tabla 4).

Tabla 4. Normalidad datos, fuerza de agarre-mano izquierda

Estadístico de prueba	Valor crítico
13,300486	15,5073131

Comprobando que los datos de la fuerza de agarre registrados para mano derecha y mano izquierda tienen una distribución normal, se realizó una regresión lineal múltiple, donde se hizo uso de métodos de selección de variables (*Forward, Backward y Stepwise*), utilizando la herramienta *RStudio*, donde se observa un valor del *R-squared* de 0,3695, el cual indica que la aceptabilidad del modelo predictivo es del 37% y *p-value*: 9.871e-08. De este modo se presenta el intercepto y los coeficientes de las variables independientes (Tabla 5).

Tabla 5. Regresión lineal mano derecha

	Estimate	Error	T Value	Pr(> t)
(Intercept)	45,64	3,98	11,44	<2e -16
Edad	-0,21	0,04	-5,77	0,000
Peso (Kg)	0,11	0,05	2,32	0,023
Consumo de Alcohol	-3,25	1,46	-2,22	0,029
Dominancia	2,96	1,98	1,49	0,140

De esta forma el modelo predictivo para la mano derecha de los trabajadores hombres dedicados a la producción de panela se calcula con la ecuación (2).

$$F. \text{máx de agarre} = 45,64 - 0,21 * \text{Edad} + 0,11 * \text{Peso} - 3,25 * \text{Consumo de alcohol} + 2,96 * \text{Dominancia} \quad (2)$$

Para la mano izquierda el *R-Squared* también tomó valor 0,2953, indicando este modelo también cuenta con una aceptabilidad del 30% aproximadamente y el *p-value*: 5,375e-08. El valor del intercepto y de los coeficientes (Tabla 6).

Tabla 6. Regresión lineal mano izquierda

	Estimate	Error	T Value	Pr(> t)
(Intercept)	52,29	1,60	31,62	<2e -16
Edad	-0,21	0,04	-5,97	0,000

De esta forma el modelo predictivo para la mano derecha de los trabajadores hombres dedicados a la producción de panela se calcula con la ecuación (3).

$$F. \text{m}á\text{x de agarre} = 52,29 - 0,21 * \text{Edad} \quad (3)$$

4. CONCLUSIONES

Según diversas declaraciones, los factores que más influyen en la fuerza de agarre son el sexo, la talla, el peso y la edad [12, 13], así mismo distintas investigaciones han dicho que la fuerza de agarre disminuye en relación a la edad [14]

Respecto al presente estudio se puede decir que los factores personas que más influyen en la fuerza de agarre de los trabajadores paneleros del municipio de Caparrapí, son el consumo de alcohol, la dominancia de la mano y la edad, cabe resaltar que a la hora de crear un nuevo modelo predictivo se deben estudiar las variables más influyentes, dado que estas pueden cambiar de acuerdo con las características demográficas de la población estudiada. En el estudio [15] se plantea que la fuerza de agarre disminuye en razón a la edad, es decir a mayor edad, menor fuerza de agarre.

Los resultados de las mediciones realizadas en la población panelera se encuentran acorde a lo planteado, dado que se observó que la fuerza máxima de agarre de esta población aumenta hasta llegar a los 32 años, en esta edad es donde los trabajadores presentan la mayor fuerza de agarre registrada en promedio, a partir de los 33 años se observó que este valor empieza a disminuir significativamente a medida que la edad aumenta.

Debido a que el nivel de confianza en ninguno de los casos supera el 50% es correcto plantear que se debería ampliar la muestra poblacional, si se desea plantear un modelo para otro grupo poblacional, se debería discriminar para mano derecha e izquierda o dominante y no dominante, según intereses de los investigadores.

REFERENCIAS

- [1] Hincapié O. (2017). Elaboración de estándares de la fuerza de agarre en individuos sanos entre 20 y 70 años residentes en la localidad de Usaquén, Bogotá. Escuela Colombiana de rehabilitación.
- [2] Lara J. (2022). Análisis de los principales factores que influyen en la fuerza muscular. Recuperado: <https://www.vitonica.com/musculacion/factores-que-influyen-en-la-fuerza-y-desarrollo-muscular>
- [3] Félix M. et al. (2018), La carga física de trabajo. Recuperado: <https://www.insst.es/documents/94886/524420/La+carga+f%C3%ADsica+de+trabajo/9ff0cb49-db5f-46d6-b131-88f132819f34>
- [4] Fundación para la prevención de riesgos laborales. (2015). Factores de riesgo ergonómico y causas de exposición. Recuperado: https://istas.net/sites/default/files/2019-12/M3_FactoresRiesgosYCausas.pdf
- [5] Fedepanela. (2021). ¡El poder de la Tecnificación para el sector panelero! Recuperado: <https://fedepanela.org.co/gremio/el-poder-de-la-tecnificacion-para-el-sector-panelero-husqvarna-colombia/>
- [6] MEN. (2018). Tasa de analfabetismo en Colombia a la baja. Ministerio de Educación Nacional.
- [7] Nurul M. et al. (2015). The relationship between anthropometry and hand grip strength among elderly Malaysians. *International Journal of Industrial Ergonomics* 50, 17–25.
- [8] Moncayo G. et al. (2020). Plan de desarrollo municipal Caparrapí. Recuperado: <http://www.caparrapicundinamarca.gov.co/plan-de-desarrollo/plan-de-desarrollo-407613>
- [9] Chilima D. et al. (2016) Nutrition and handgrip strength of older adults in rural Malawi. *Public Health Nutrition* 4 11–17.
- [10] Fundación para la prevención de riesgos laborales. (2018). Principales Riesgos ergonómicos en el sector. Recuperado: https://agrario.ibv.org/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=141
- [11] Lucio A. et al. (2020). Fuerza de agarre como predictor de composición corporal en estudiantes universitarios. *Revista Chilena de Nutrición* 47, 604–611.

- [12] Silva B. et al. (2012). Validade preditiva de equações de referência para força de preensão manual em homens brasileiros de meia idade e idosos. *Fisioterapia e Pesquisa* 19, 351–356.
- [13] Flood A. et al. (2014) The use of hand grip strength as a predictor of nutrition status in hospital patients. *Clinical nutrition* 33, 106–114.
- [14] Amo F. et al. (2020). Factors associated with grip strength among adolescents: An observational study. *Journal of hand therapy* 33, 96–102.
- [15] Santos R. et al. (2017). Hand grip strength in healthy young and older Brazilian adults: Development of a linear prediction model using simple anthropometric variables. *Kinesiology* 49, 208–216.

Aportes a la sostenibilidad social de proyectos de infraestructura urbana. Un caso de estudio comparado entre criterios de evaluación y actores de interés para infraestructuras en el sur de Chile

María Jesús Osses Osses¹

Leonardo Sierra Varela²

Felipe Araya³

^{1,2}Universidad de La Frontera

³Universidad Técnica Federico Santa María

Chile

La sostenibilidad social es el área de la sostenibilidad que posee menos investigación y consideración al momento de evaluar una infraestructura. La poca consideración se debe a lo complejo que es evaluarla y a lo contexto-dependiente que puede ser la determinación de los criterios sociales y actores de interés que intervienen en ella. Frente a esto no existe una lista de criterios sociales y actores de interés definidos y validados que permita tener una base para integrarlos en la evaluación social de las infraestructuras. El objetivo de este estudio es explorar y validar la incidencia de criterios sociales y actores de interés en tres diferentes proyectos de infraestructuras desarrollados en la zona sur de Chile: 1) proyecto de habitabilidad rural, 2) proyecto de mejoramiento de pavimentos, y 3) proyecto de construcción del colector de aguas lluvias. La metodología aplicada es la siguiente: 1) se realiza la revisión sistemática de la literatura y se realizan 76 entrevistas a actores relevantes dentro de cada uno de los casos de estudio: autoridades, residentes, transeúntes; 2) se diseña y aplica una encuesta con preguntas en escala de Likert, para determinar el nivel de importancia que tiene cada criterio social y actor de interés identificado; 3) se realiza un análisis de inferencia estadística a las encuestas para crear una lista de criterios sociales y actores de interés por cada caso de estudio a lo largo del ciclo de vida del proyecto; y 4) se genera una lista que integra los criterios sociales y actores de interés común a los proyectos analizados. Disponer de un set de criterios y actores de interés relevantes para proyectos de infraestructura contribuye a facilitar la evaluación de la sostenibilidad social de proyectos de infraestructura.

¹ Ingeniera Constructora y Licenciada en Ciencias de la Ingeniería.

Contacto: *m.osses03@ufromail.cl*

² Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Doctor en Ingeniería de la Construcción.

Contacto: *leonardo.sierra@ufrontera.cl*

³ Ingeniero Civil y Doctor en Ingeniería civil.

Contacto: *felipe.araya@usm.cl*

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad es el desarrollo de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades [1]. Además, el concepto de sostenibilidad está asociado a tres dimensiones, económica, ambiental, y social. Aunque la sostenibilidad ha ganado terreno en el área de la construcción, este avance aun no es suficiente. Las herramientas de calificación existentes para la infraestructura no implican una consideración equilibrada de las dimensiones sociales, económicos y ambientales [2]. Sin embargo, la atención y el análisis se centra en una visión exclusivamente económica y ambiental olvidando en gran medida la dimensión social en el desarrollo sostenible.

La dimensión social en el desarrollo de una infraestructura puede tener efectos perjudiciales a corto y largo plazo, como, por ejemplo, conflictos entre las comunidades, paralización de la infraestructura, entre otros [3]. Las infraestructuras además de requerir grandes recursos económicos también involucran una amplia participación de comunidades en los lugares donde se instalan, tanto en sus etapas de planificación, diseño y construcción, así como en la operación y mantenimiento que son usualmente de largo plazo [4]. Dentro de la sostenibilidad social existen dos conceptos que durante los últimos años se han incorporado en el ámbito de la construcción:

1. Los criterios sociales que se pueden definir como un conjunto de descriptores de los impactos sociales causados por un proyecto que son propios de un contexto determinado [5] y que pueden llegar a ser muy variables, como, por ejemplo, la opinión pública y el patrimonio. Los criterios sociales de proyectos de infraestructura urbana tienen impactos amplios y de largo plazo que aumentan su importancia y su determinación puede considerarse como una de las herramientas de planificación más importantes de un proyecto [6].
2. Los actores de interés personas, grupos u organizaciones, que tienen interés común en un proyecto, es alguien que tiene algo que ganar o algo que perder a partir de los resultados de un determinado proyecto [7]. Dentro del desarrollo de un proyecto la identificación y participación de estos actores de interés es una acción clave. Por ende, la participación de las partes interesadas debe considerarse un elemento central de cualquier plan de desarrollo sostenible [8]. Por lo tanto, es más probable que un proyecto tenga éxito, especialmente a largo plazo, si toma en consideración las expectativas de las partes interesadas y sus necesidades.

Al considerar la participación de las partes interesadas se busca evitar los conflictos sociales, ya que son los actores de interés los que los generan; Los conflictos sociales van desde las campañas a nivel comunitario hasta las grandes protestas que buscan detener los proyectos [9]. Según la iniciativa Environmental Justice, América Latina y el Caribe es la región donde se presenta el mayor número de conflictos relacionados con infraestructuras y su construcción [10]. Según [9] de 200 proyectos estudiados en AL y C, 36 fueron cancelados debido a conflictos, mientras que 162 proyectos se enfrentaron a retrasos y 116 se enfrentaron a sobrecostos. La razón por la que surgen con tanta fuerza los obstáculos (conflictos) que impone el entorno social para que se realicen algunos tipos de infraestructuras, se debe a que estas se desarrollan generalmente en comunidades y regiones, donde desde la percepción de las comunidades existe un abandono por parte de las autoridades [11]. Cabe destacar que el conflicto puede reducir o incluso anular los beneficios de la sostenibilidad en las comunidades.

En base a lo establecido por [12] las políticas y las decisiones sociales deben considerar y potenciar el bienestar de la comunidad desde una perspectiva sostenible. Otro aspecto que considerar es como las infraestructuras cambian los espacios territoriales donde se construyen. Por ejemplo, existen estudios como [13], que evalúan críticamente la relación entre el transporte y el desarrollo económico, y afirman que en muchas ocasiones la infraestructura de transporte produce un efecto contrario al esperado. Desde esta perspectiva, los análisis han mostrado que el efecto de la infraestructura depende de si el emplazamiento se realiza en un espacio central o si se desarrolla en un espacio periférico y que, más que cohesión territorial, una nueva infraestructura puede aumentar las diferencias territoriales.

La sostenibilidad social de las infraestructuras depende de los criterios de evaluación [14]. Es decir, mediante la evaluación social de un proyecto se puede identificar y valorar los beneficios y costos sociales para determinar la rentabilidad social. La realización de un proyecto debe generar beneficios sociales mayores con respecto al costo que tiene para la sociedad [11]. Por esto que [15] consideran que aún queda mucho por hacer en el campo de la medición con indicadores que permitan obtener una mejor evaluación de la sostenibilidad. Además, [11] establece que las interacciones sociales de los diversos actores y comunidades surgen como respuesta de la construcción de las infraestructuras y revelan la importancia de establecer criterios sobre el análisis social, al profundizar en los problemas e impactos sociales que se van gestando desde la fase de planificación y diseño, que se traducen en hechos concretos en la fase de ejecución y que tienden a materializarse en conflictos sociales.

Todo lo anterior hace necesario un estudio que considere los aspectos sociales relevantes en el desarrollo de una infraestructura para tenerlos en cuenta durante sus etapas tempranas. Por lo tanto, este trabajo apunta a explorar y validar la incidencia de criterios sociales y sus actores de interés en tres diferentes proyectos de infraestructura.

2. MARCO REFERENCIAL

Existen estudios que profundizan en un tipo de infraestructura en particular, como infraestructura de drenaje urbano o viviendas. Por ejemplo, [16] analiza la persistencia de las inundaciones urbanas y la incapacidad de la infraestructura de alcantarillado para hacer frente a las aguas pluviales. Su aporte más considerable trata en cómo superar las barreras para la aplicación de la sostenibilidad social y la consideración de actores de interés locales desde el inicio del proyecto de drenaje urbano. [17] evalúa la sostenibilidad social en construcción de complejos habitacionales y sus alrededores teniendo como objetivo comprender los aspectos físicos y no físicos de la sostenibilidad social. Dentro de los factores no físicos indica a la seguridad, las redes sociales locales, inclusión social, la integración espacial, el patrimonio cultural, el sentido de pertenencia e identidad, la participación y la organización de la comunidad. [17] finalmente afirma que es necesario considerar la infraestructura social en el diseño y planificación del desarrollo residencial, ya que, un diseño deficiente afecta negativamente en las diversas formas de interacción social y no fomenta un sentido de pertenencia lo cual no genera un bienestar en los residentes y no aporta a su calidad de vida.

De forma similar, en la línea de lo habitacional, [18] identifica los indicadores sociales más relevantes durante la etapa de toma de decisión y planificación de los megaproyectos de construcción masiva de viviendas habitacionales en el Medio Oriente. Estos indicadores fueron agrupados en cuatro grandes criterios: aumento de sustentabilidad de la sociedad; mejora en salud, seguridad y habitabilidad; disminución de riesgo y barrio. Además, [18] determina que en lo que respecta a la sostenibilidad social, resulta difícil aplicar los criterios sociales de un proyecto a otro considerando que cada proyecto de construcción es único y eventualmente específico por ende los criterios a considerar deben ser sensibles al contexto.

Actualmente en relación con proyectos de viviendas públicas para poblaciones vulnerables específicamente en la Región de la Araucanía, Chile [19] indica que los métodos de evaluación de ese tipo de proyectos no garantizan condiciones territoriales socialmente sostenibles. [19] describe diez criterios que abordan la toma de decisión. Estos criterios son: seguridad y salud comunitaria, consideración de la opinión pública en el proyecto, liderazgo de la directiva, infraestructura del esparcimiento de barrio, mejora de la disponibilidad económica familiar, integración del diseño en el contexto, motivación al patrimonio familiar, conectividad y acceso, integración en el barrio e identidad y cultura en el barrio.

En relación con la identificación de criterios sociales, [20, 21] los identifican, pero no los vinculan con etapas en el ciclo de vida de un proyecto. No así [22] que además de identificar criterios sociales los relaciona con algunas etapas en el ciclo de vida de un proyecto habitacional. Los criterios sociales que más se repiten dentro de los autores son bienestar, salud, seguridad, patrimonio, participación y satisfacción. Algunos otros ejemplos de criterios sociales son: comodidad de los ocupantes, ambientes inclusivos, acceso a las instalaciones, participación y control, educación, salud y seguridad [23]. Además, se pueden incluir

elementos complejos como objetos y estructuras sociales (patrimonio y hábitat), valores (sentido de pertenencia), cultura local y tradiciones [24]. Al ser elementos complejos son difíciles de predecir y cuantificar y pueden ser tenidos en cuenta de manera diferente por las autoridades, los tomadores de decisiones y los desarrolladores de proyectos [25].

Existen autores que se enfocan en solo un tipo de infraestructura y clasifican en el ciclo de vida de un proyecto los actores de interés como lo es [26]. En cambio, autores como [27, 28] solo identifican actores de interés, no hacen alusión a un tipo de infraestructura específico y no los vinculan al ciclo de vida de un proyecto. Por otro lado, [29] identifica los actores de interés y los relaciona con las etapas del ciclo de vida de un proyecto no específico. Esto muestra que a medida que avanzan los años y se realizan más investigaciones sobre los AI implicados en infraestructuras, su identificación cada vez es más precisa y profunda. Los actores de interés más reiterativos dentro de la revisión de la literatura son los accionistas, las agencias reguladoras, los arquitectos, los proveedores de materiales, el área directiva, los trabajadores y los usuarios finales (i.e., clientes, consumidores).

3. CASOS DE ESTUDIO

Esta investigación analiza tres diferentes proyectos de infraestructura tomadas como casos de estudio, en la Tabla 1 se detallan las principales características de cada proyecto.

Tabla 1. Antecedentes casos de estudio

Caso de estudio	Ubicación	Magnitud	Tipo
Proyecto Habitabilidad Rural	Sector Boyeco – Temuco	27 viviendas	Habitacional
Mejoramiento Pavimento	Etapa 1: Av. Prieto Norte – Calle Graneros Etapa 2: Calle Graneros – Av. Javiera Carrera Etapa 3: Av. Javiera Carrera – Calle El Orbital	4,5 km	Vial
Construcción de colector de aguas lluvias	Etapa 1: Av. San Martín – Calle Senador Estébanez – Av. Alemania – Calle Holandesa – Calle Domingo Rojas – evacuación a Canal Gabriela Mistral. Etapa 2: Av. San Martín Etapa 3: Plaza de Las Banderas	2.100 m	Sanitario

3.1 Caso de Estudio 1

Proyecto Habitabilidad Rural: Está basado en el programa de habitabilidad rural y se ubica en un territorio urbano – rural con viviendas como la Figura 1, en la localidad de Boyeco a 14 km de la ciudad de Temuco. Este proyecto consiste en la construcción de viviendas sociales como se muestra en la Figura 2 para una comunidad mapuche que favorece a 27 familias con un total de 61 personas.



Figura 1. Vivienda de la zona



Figura 2. Modelo y plano vivienda subsidio

3.2 Caso de Estudio 2

Es el Mejoramiento Av. Pedro de Valdivia, que es una de las vías principales de la ciudad de Temuco y consiste en el mejoramiento de 4,5 km de la vía urbana bidireccional que se muestra en la Figura 3. La mejora incluye la ampliación a 2 pistas por cada sentido con pavimento de hormigón, la mejora en los espacios peatonales, la construcción de ciclovías, una rotonda y puentes viales que mejoran la conectividad entre las vías de alto tráfico como se ve en la Figura 4.



Figura 3. Calle Pedro de Valdivia pre- mejoramiento



Figura 4. Planta de la conexión de Av. Pedro de Valdivia y Av. Prieto Norte terminada

3.3 Caso de estudio 3

Proyecto construcción de colector de aguas lluvias. Consiste en la construcción de 2.100 metros aprox. de colectores como el que se muestra en la Figura 5 en la ciudad de Temuco ubicados en Av. Alemania, Calle Senador Estébanez y por último en dos sectores de la Av. San Martín. Estos colectores son los que recogen, conducen y evacuan las aguas lluvias de cada sector. El objetivo de este proyecto es aumentar la capacidad de drenaje de las vías de alto tráfico evitando las usuales inundaciones como se ve en la Figura 6 producidas durante los meses de invierno principalmente en Av. Alemania y Av. San Martín.



Figura 6. Esquina Av. Alemania – Dinamarca



Figura 5. Revisión de proceso de instalación de colector por las autoridades

4. MÉTODO

Este trabajo es un estudio mixto cualitativo y cuantitativo que consta de 2 etapas; la figura 7 presenta los insumos (*input*), el proceso y el resultado (*output*) de cada una.

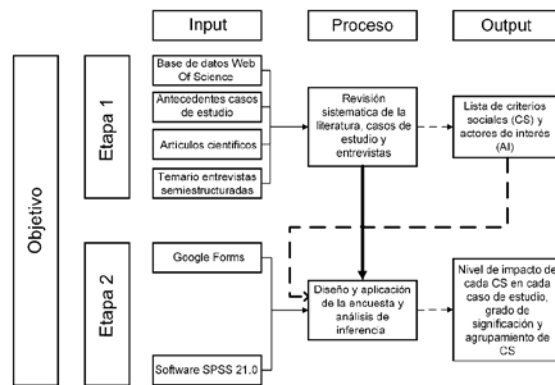


Figura 7. Esquema de metodología

4.1 Etapa 1

La primera etapa requiere de insumos como el acceso a una base de datos de artículos y revistas científicas de la Web Of Science WOS, los antecedentes de cada uno de los casos de estudio, artículos externos a la base de datos derivados de las referencias de un conjunto de artículos primarios y el temario de entrevistas semiestructuradas. El proceso para llevar a cabo esta etapa es la revisión sistemática de la literatura, donde se identifican temas principales como lo es el estudio de los Sistemas de Evaluación de Sostenibilidad de la Infraestructura, el Estudio de la Sostenibilidad Social en diferentes tipos de Infraestructuras y la identificación de CS y AI por otros autores.

Además, se realizan entrevistas a actores relevantes dentro de los casos de estudio como residentes de la zona, autoridades y locatarios comerciales. Estas entrevistas son para entender mejor el contexto de cada caso y seleccionar algunos CS en base a las respuestas de los entrevistados. Las entrevistas se realizaron de forma presencial durante los meses de marzo y abril del 2019. Para la realización de las entrevistas no se utilizó ningún software, se realizaron en forma manual. En base a la revisión de la literatura y de los antecedentes de los casos de estudio se identificaron aquellos aspectos sociales de relevancia por cada infraestructura. A partir de esto se planteó un temario tentativo para abordar cada entrevista.

El temario tentativo fue revisado por un especialista dentro del área de infraestructura de los casos de estudio para validar la incidencia de los temas. Para el caso 1 fueron 15 entrevistas, en el caso 2 se realizaron 26 y en el caso 3 se aplicaron 33. El resultado de esta etapa es una lista de criterios sociales y actores de interés por cada uno de los casos de estudio a lo largo del ciclo de vida de cada proyecto. Finalmente, se genera una lista que integra los criterios sociales y actores de interés común a los proyectos analizados.

4.2 Etapa 2

En la siguiente etapa se valida la incidencia de los criterios sociales en los casos de estudio. En este punto se diseña y distribuye una encuesta a través de un formulario de Google y se utiliza el software SPSS 21.0 para analizar las respuestas y crear tablas de contingencia que es uno de los modos más comunes y eficaces de presentar la información estadística, ya que es una forma de transmitir mucha información en poco espacio [30]. Con todo esto se consigue como resultado el nivel de impacto por criterio social en cada caso de estudio. En esta etapa también se plantea la hipótesis de que existen infraestructuras que ejercen impactos sociales significativos y diferenciados. Para comprobar la hipótesis se aplica un análisis de interferencia mediante la prueba de Chi cuadrado que se utiliza para ver el sentido de la correlación de las variables.

El estadístico chi-cuadrado tomará un valor igual a 0 si existe concordancia perfecta entre las frecuencias observadas y las esperadas; por contra, el estadístico tomará un valor grande si existe una gran discrepancia entre estas frecuencias, y consecuentemente se deberá rechazar la hipótesis nula [31]. Además, se utiliza la prueba W de Kendall para estudiar la concordancia entre el conjunto de rangos [32]. El valor de W oscila entre 0 y 1. El valor de 1 significa una concordancia de acuerdos total y el valor de 0 un desacuerdo total. La tendencia a 1 es lo deseado [33]. Además, se utiliza el software SPSS 21.0 para realizar análisis factorial para la agrupación de los CS. Este análisis agrupa las variables, en este caso los criterios sociales según similitudes

elaborando grupos a partir de estos conjuntos de CS que tengan rasgos en común. Los grupos homogéneos se forman con las variables que correlacionan entre sí [34].

Las limitaciones que posee este estudio son: 1) los proyectos son de Chile, por lo que los criterios podrían no ser generalizables a otros contextos; 2) el tamaño de la muestra de respuestas de las encuestas puede ser limitado para entender nuestros resultados como significativos de la población en estudio, sin embargo, de todas formas, permite identificar los criterios y actores significativos para los casos de estudio; y 3) el alcance de los criterios sociales y actores de interés encontrados en este estudio se limitan a los tipos de proyectos que se incluyeron en este estudio (i.e., pavimentación, vivienda, drenaje), y no necesariamente aplican a otros tipos de proyecto de infraestructura.

5. RESULTADOS

5.1 Criterios sociales y actores de interés

En la Tabla 2 se presenta la descripción de cada uno de los criterios sociales, y en la Tabla 3 la descripción de los actores de interés identificados para el Caso de estudio 1: Proyecto Habitabilidad Rural.

Tabla 2. Descripción Criterios Sociales Caso de Estudio 1

Criterio social	Definición
CS 1: Integración del diseño en el contexto	Esto implica como se mezcla el diseño de las nuevas viviendas para que no impacte visualmente el entorno de la comunidad; en consideración que existe una cultura mapuche arraigada en el sector.
CS 2: Acceso y movilidad de la comunidad	Esto implica la influencia que tiene el proyecto en el transporte de las personas de la comunidad, en la forma y en el tipo de movilización que tienen. Es importante que no se afecte negativamente estos aspectos, sino que sea un aporte positivo.
CS 3: Identidad	Apunta a que las personas puedan sentir como propias las viviendas, que se sientan cómodas con ellas y que no lo sientan como invasión a su territorio.
CS 4: Motivación al patrimonio familiar	Apunta a incentivar a las personas beneficiadas a cuidar y a mejorar si es necesario las viviendas entregadas para que formen parte de su patrimonio.
CS 5: Espacios de desarrollo familiar	Promueve la comunicación y unión familiar dando un espacio dentro de la vivienda para que esto ocurra. Tales como, una sala de estar o una cocina con concepto abierto que conecte todos los espacios de la vivienda y que sea un lugar de conversación para la familia.
CS 6: Fomentar participación de partes interesadas	Incluye la motivación e incentivo a las partes interesadas de que expresen sus opiniones, sugerencias o reclamos respecto al proyecto en consideración a la diversidad de opiniones
CS 7: Legitimidad	Esto implica evidenciar la aceptación que reciba el proyecto respecto a lo que se diseñó, planificó y lo entregado, si realmente cuenta con la aprobación de la comunidad beneficiada.
CS 8: Confort interior	Apunta a lograr una comodidad de las necesidades dentro de la vivienda, dando un espacio adecuado al diseño y tamaño que asegure el bienestar de los habitantes y un adecuado desarrollo de sus actividades diarias.
CS 9: Liderazgo de directiva:	Implica poseer una relación directa y cercana con los representantes de la comunidad que forman parte de la directiva, se requiere que dicha directiva cuente con el respaldo de toda la comunidad para que tenga completa representatividad.
CS 10: Opinión pública:	Hace referencia al tipo de opinión se generará entre las personas de la comunidad de Boyeco y en gente externa que visite el sector, si serán cosas positivas o negativas.

Tabla 3. Descripción Actores de Interés Caso de Estudio 1

Actor de interés	Definición
AI 1: Personas mapuches beneficiadas	Corresponden a personas vulnerables, la mayoría con bajo nivel educacional, arraigados a su cultura y con pocas oportunidades laborales de vez en cuando un poco tímidos y bastantes desconfiados. El interés por el proyecto es directo, ya que son los beneficiados con las viviendas sociales.
AI 2: Personas del sector no beneficiadas:	En su mayoría corresponden a campesinos, con nivel educacional medio. La mayoría de estas personas son vulnerables, y están disconformes por no ser incluidos. No se ven beneficiados por las viviendas.
AI 3: Dirigentes de la comunidad	Se asocian con personas influyentes, informadas y perseverantes, buscan dar solución a las problemáticas de su comunidad. Estas personas cumplen el rol de ser intermediarios entre las autoridades o el organismo mandante y la comunidad.
AI 4: Mandante (SERVIU):	Personas de un alto nivel educacional, son un organismo del estado que busca dar solución a dificultades habitacionales, deben tener cercanía con la gente, ya que siempre trabajan con personas.
AI 5: Contratista general de la obra	Empresa constructora de tamaño medio con compromiso social, cercana a la zona del proyecto, elegidos entre los licitantes por su buena propuesta para el proyecto. Se benefician monetariamente al ser elegidos para construir las viviendas.

En la Tabla 4 se presenta la descripción de cada uno de los criterios sociales, y en la Tabla 5 de los actores de interés identificados para el caso de estudio 2: Mejoramiento Pavimento

Tabla 4. Descripción Criterios Sociales Caso de Estudio 2

Criterio social	Definición
CS 1: Trabajo	Se refiere a que las fuentes laborales de los vecinos del sector se verán afectadas negativamente ya que, por ejemplo, en varios casos se deberá expropiar el local o el lugar de trabajo haciendo que los ingresos de los locatarios disminuyan.
CS 2: Confort:	Esto implica establecer requerimientos para no afectar de forma negativa a los residentes y locatarios del sector afectado Tales como un plan de mitigación de ruidos y de contaminación producto del polvo que general algunas faenas.
CS 3: Estética y degradación, recreación y esparcimiento	Apunta a buscar formar armonía estética con el entorno creando áreas verdes de calidad y que sean una cantidad considerable que permitan dar a la comunidad espacios de recreación y esparcimiento donde puedan desenvolverse de manera cómoda y tranquila.
CS 4: Movilidad ecológica	Implica incluir dentro del transporte común medios no motorizados tales como bicicletas, patines, scooter, entre otros y darles un espacio en la avenida para que transiten de manera segura con sus respectivas señaléticas y medidas de seguridad.
CS 5: Seguridad vial	Se refiere a disminuir los riesgos de accidentes de tránsito mediante, por ejemplo, el uso de señaléticas, la construcción de lomos de toro en sectores específicos, la colocación de semáforos, entre otros.
CS 6: Seguridad en la construcción	Consiste en capacitar al personal mostrando los riesgos y peligros que pueden encontrar dentro de una obra de este tipo. Además, disponer del equipo de seguridad necesario para todo el personal priorizando el bienestar físico de los trabajadores.
CS 7: Salud	Esto implica que durante el desarrollo del proyecto se debe considerar un procedimiento de acceso destinado a los servicios de salud, por ejemplo, en caso de que se presente un accidente y se requiera de la presencia una ambulancia, bomberos u otro tener vías despejadas para que los servicios de emergencia puedan ingresar.
CS 8: Tráfico	Se relaciona con problemas relacionados con el flujo vehicular que se ve afectado debido a los desvíos, a los cierres temporales de calles, a la congestión en algunos puntos por la construcción de la obra y por el tránsito de maquinarias de gran envergadura.
CS 9: Plusvalía	Apunta a que al modificar y modernizar la Av. Pedro de Valdivia las viviendas aledañas a esta adquieren un valor monetario más elevado. El aumento del valor de las viviendas es un beneficio para los dueños de dichas propiedades ya que pueden ganar más dinero con la venta de estas.
CS 10: Fomentar la participación de las partes interesadas	Este criterio incluye la motivación e incentivo a las partes interesadas de que expresen sus opiniones, sugerencias o reclamos respecto a la infraestructura en consideración a la diversidad de opiniones.
CS 11: Identidad	Esto implica dar al sector una identidad, un sello propio con el que los vecinos se sientan conformes y partes de él; que sientan el barrio como algo suyo, algo que ellos formaron y que con esfuerzo fueron construyendo en base a sus ideas y principios culturales.

Tabla 5. Descripción Actores de Interés Caso de Estudio 2

Actor de interés	Definición
AI 1: Unidad de control de tránsito	Corresponde a una entidad pública que sus principales funciones son proponer políticas nacionales en materias de transporte, supervisar a empresas públicas y privadas que operen medios de transporte y controlar el cumplimiento de la ley.
AI 2: Agente público de ayuda social	Corresponde a un organismo perteneciente al gobierno que se enfoca principalmente en programas para erradicar la pobreza y brindar protección y una mejor calidad de vida a personas vulnerables.
AI 3: Mandante (Gobierno regional de La Araucanía):	Es la personalidad jurídica, que tiene a su cargo la administración superior de la Región de la Araucanía, y cuya finalidad es el desarrollo social, cultural y económico de ésta.
AI 4: Mandante (MINVU):	Es el Ministerio que está encargado de la planificación, desarrollo y construcción de infraestructuras, además urbanizar y normar el uso de los espacios de los centros urbanos, haciéndolos apropiados para vivir.
AI 5: Residentes de los sectores involucrados:	Se refiere a personas que habitan el sector que es intervenido por el proyecto, por ejemplo, Av. Pedro de Valdivia o a una cuadra de esta. Es el actor que tiene mayor relevancia en la ejecución del proyecto, ya que este se verá afectado en cada etapa del ciclo de vida.
AI 6: Usuarios de la vía	Usuarios de los sectores intervenidos durante la construcción del proyecto ya sea de trayecto ida y vuelta a través de estos o simplemente de paso por el sector para conectar con su destino.
AI 7: Locatarios comerciales:	Se refiere a los dueños de locales comerciales ubicados en la Avenida Pedro de Valdivia o a una cuadra de esta. Se verán afectados durante todo el ciclo de vida positiva o negativamente.
AI 8: Vecinos aledaños	Son las personas que viven entre una y cuatro cuadras de la Avenida Pedro de Valdivia que utilizan la avenida para transitar y llegar a su vivienda.
AI 9: Contratista general de la obra	Empresa constructora a cargo de la obra, se relaciona directamente con el proyecto porque es la ejecuta directamente su desarrollo.

La Tabla 6 contiene la descripción de cada uno de los criterios sociales, y la Tabla 7 de los actores de interés identificados para el caso de estudio 3: Proyecto de construcción de colector de aguas lluvias.

Tabla 6. Descripción Criterios Sociales Caso de Estudio 3

Criterio social	Definición
CS 1: Diseño	Implica evitar la acumulación de agua en las calles durante el periodo de invierno evitando así la inundación y el bloqueo a los accesos a los locales comerciales, centros de salud, centros educacionales, entre otros.
CS 2: Seguridad	Se refiere a evitar que se produzcan accidentes de tránsito derivados de la intersección, cortes o desvíos en las calles donde se está trabajando o que se produzcan accidentes laborales, para esto se debe implementar una buena política de prevención de riesgos.
CS 3: Tráfico	Promueve asegurar un expedito desplazamiento por las calles que serán intervenidas durante el desarrollo de la obra para evitar atochamientos excesivos por congestión vehicular evitando reclamos por parte de la comunidad.
CS 4: Contaminación	Apunta a disminuir la contaminación acústica, la emisión de polvos y otros residuos contaminantes. La disminución de la contaminación se logra utilizando medidas ambientales.
CS 5: Costo económico	Se refiere a no caer en errores constructivos que puedan incurrir en un gasto para la empresa constructora y que esta tenga que disminuir el monto de sus utilidades para cubrir dicho error.
CS 6: Plazos	Este criterio hace referencia a apearse al plazo de la obra dictado en el contrato para evitar perjuicios económicos, rechazo de la comunidad, prolongación de las congestiones vehiculares y de las molestias ocasionadas por la obra.
CS 7: Fomentar la participación de los actores de interés	Este criterio incluye generar espacios de reuniones entre las autoridades, las entidades que desarrollan el proyecto y la comunidad afectada por este para que se comparta la información, se discutan opiniones y sugerencias respecto al proceder y al diseño de la infraestructura.
CS 8: Opinión pública	Apunta a verificar que lo entregado sea de acuerdo con lo que se proyectó para que exista una conformidad respecto al resultado y con las entidades encargadas del proyecto. Evitando así que se produzcan reclamos o denuncias por parte de la comunidad y que esto afecte a la popularidad de las autoridades.
CS 9: Reputación	Generar una opinión positiva de las entidades que desarrollan el proyecto, por ejemplo, la constructora a cargo aumentando el nivel de alcance de estas y la confianza existente por parte de la comunidad.
CS 10: Función técnica	Se refiere a respetar y cumplir en la totalidad las especificaciones técnicas del proyecto para evitar cambios que produzcan aumento en los costos de mantención de la infraestructura, que disminuya la vida útil del esta o que cause un perjuicio económico para la empresa constructora.
CS 11: Salud	Implica que durante el desarrollo del proyecto se debe considerar un plan de adecuado acceso para los servicios de salud en caso de que se presente un accidente y se requiera de la presencia una ambulancia, bomberos u otro.
CS 12: Alteración de servicios:	Se refiere a que durante el transcurso de la obra se produzcan cortes en los suministros básicos como agua o alcantarillado; además, que se interrumpan los accesos a los centros de salud u otro debido al cierre de algunas zonas por los trabajos con maquinarias.

Tabla 7. Descripción Actores de Interés Caso de Estudio 3

Actor de interés	Definición
AI 1: Mandante (DOH):	Es la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) perteneciente al MOP. La DOH provee de servicio de infraestructura hidráulica que permite el óptimo aprovechamiento del agua y la protección del territorio y de las personas, mediante un equipo de trabajo competente y responsable.
AI 2: Oficina de gestión social:	Corresponde al equipo de trabajo integrado por profesionales encargados del área de gestión social de la obra, la cual trabaja con distintos mecanismos para promover la inclusión social y la vinculación efectiva de la comunidad en los proyectos de carácter social, lo que permite a la comunidad un sentido de pertenencia y participación ciudadana. Estas oficinas pertenecen a la constructora a cargo.
AI 3: Oficina de prevención de riesgos	Profesionales encargados de la prevención de riesgos de la obra, pertenecientes a la constructora a cargo. Este equipo es el encargado de que los procesos de obra se ejecuten de manera segura tanto para los trabajadores como para el medio que interviene el proyecto.
AI 4: Empresa encargada del diseño:	Es la empresa SIGA, consultora privada encargada del diseño del proyecto. Empresa multinacional de ingeniería que ofrece diferentes servicios, por ejemplo, inspección técnica de obras, diseño de proyectos y consultoría.
AI 5: Locatarios comerciales	Corresponde a los dueños de locales comerciales del sector que es intervenido por el proyecto y sus alrededores. Los locatarios comerciales son actores que se ven afectados por la construcción de este proyecto directa o indirectamente, ya que por la intervención que se ejecuta en sus accesos afecta a la transitabilidad, el confort y la seguridad de los usuarios. La intervención de los accesos afecta también a los locatarios con respecto a las ventas que tendrán a lo largo del desarrollo del proyecto.
AI 6: Alta gerencia de la empresa constructora a cargo de la obra	Son personas competentes en el área de la construcción y administración de una constructora, son los encargados de guiarla para que cumpla con los requisitos de los estándares solicitados. La alta gerencia busca entregar el mejor servicio priorizando la calidad y compromiso con el proyecto y sus integrantes, de esta forma impulsan su crecimiento aumentando el nivel de alcance de su empresa.

AI 7: Usuarios de la vía	Corresponde a los usuarios que utilizan la vía en cualquier modo de transporte, por ejemplo, caminando, en bicicleta, en auto o locomoción colectiva, estos no necesariamente son habitantes del sector, pero ocupan estas vías como conexión a sus lugares de trabajo, centros comerciales, locales de comida o de recreación.
AI 8: Oficina de impacto ambiental y de calidad de la constructora	Se refiere a personas enfocadas en el área ambiental y de calidad que buscan cumplir con las normas establecidas de la manera que el proyecto no impacte negativamente al medio ambiente y cumpla con los niveles de calidad esperados para entregar un resultado lo más completo posible.
AI 9: Dirección de tránsito	Funcionarios que pertenecen a la municipalidad de Temuco que son los encargados de distribuir y entregar las señaléticas para el tránsito de las calles que deberán ser intervenidas. Los miembros de la dirección de tránsito deben estar atentos a los desvíos que se realizan en las calles y realizar un plan de tránsito donde se indiquen rutas alternativas para los conductores vehiculares y peatones.
AI 10: Residentes de los sectores involucrados	Corresponde a un grupo de personas que habitan en el sector que es intervenido por el proyecto, por ejemplo, Avenida Alemania, Avenida San Martín y sus alrededores. Los residentes son uno de los actores que tiene mayor relevancia en la ejecución del proyecto, desde su inicio hasta el término, ya que se verá afectado en cada etapa del ciclo de vida de este, por lo tanto, su participación es clave en el transcurso de ejecución.
AI 11: Empresa fiscalizadora en representación de la DOH	Se refiere a REA Ingeniería, que es una empresa privada que cumple la función de fiscalizar los trabajos realizados e informar al mandante de lo que se está haciendo, es una empresa ética que no debe dejar pasar situaciones que tengan algún riesgo para la calidad del proyecto

5.1.1 Integración de criterios sociales y actores de interés en el ciclo de vida de la infraestructura

Al integrar los criterios sociales y actores de interés en los 3 casos de estudio como se ve en la figura 8 se determinan afinidades y diferencias. En este punto se reorganizan y recodifican los criterios sociales y actores de interés como un grupo más integrado que incluye criterios sociales y actores de interés similares. De esta forma se identifican criterios y actores de interés comunes y diferenciados. Estos últimos son los que no presentaron afinidad entre los casos de estudio.

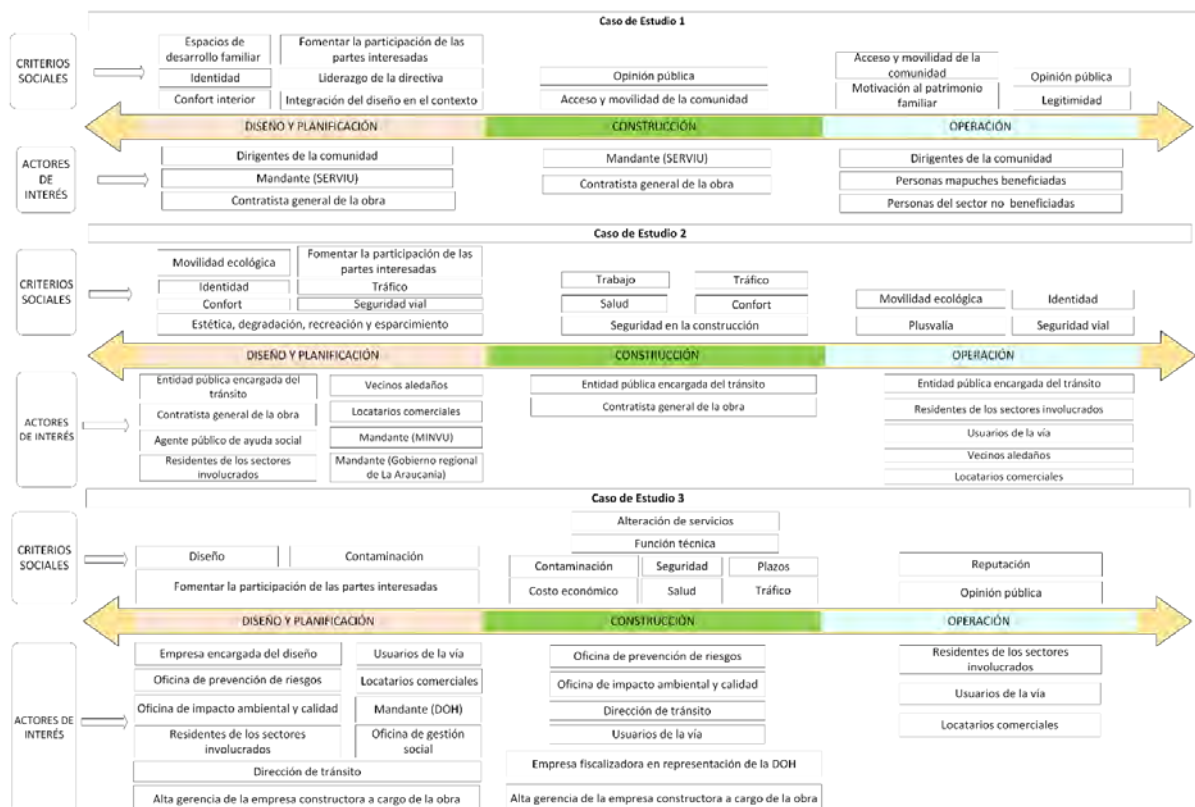


Figura 8. Esquema de distribución de CS y AI en el ciclo de vida de los Casos de Estudio

De los criterios y actores comunes y diferenciadores se obtiene la lista final de aquellos que serán evaluados para identificar el nivel de impacto (Etapa 2) que poseen en cada caso de estudio. La descripción de cada uno de los criterios sociales y actores finales integrados se presenta a continuación y la distribución de estos en el ciclo de vida de una infraestructura se muestra en la Figura 9. Los CS del 1 al 12 son criterios comunes mientras que el CS 13 y 14 son diferenciadores, mientras que todos los AI son comunes.

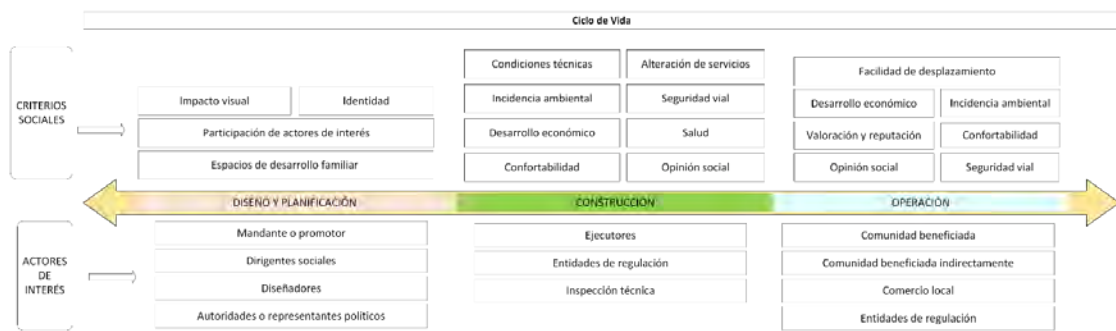


Figura 9. Esquema de distribución de CS en el ciclo de vida general de una infraestructura

Criterios comunes

- **CS1 Opinión social:** Es la opinión entre las personas de acuerdo con la conformidad de lo entregado y de su desarrollo.
- **CS2 Valoración y reputación:** Corresponde al valor, aceptación y confianza en el desempeño técnico del desarrollo de los trabajos por parte de los actores involucrados en el proyecto.
- **CS3 Salud:** Se asimila el contar con un plan adecuado para los servicios de salud en caso de que se presente un accidente u otra situación en el desarrollo del proyecto
- **CS4 Participación de actores de interés:** Es la inclusión de las opiniones de las partes interesadas en el diseño del proyecto. Incentivar a la participación a través de reuniones para compartir opinión entre las autoridades, las entidades que desarrollan el proyecto y la comunidad afectada.
- **CS5 Confortabilidad:** Díganse cuando la obra entregada o su desarrollo permiten satisfacer las necesidades de los usuarios de forma digna o con la menor alteración posible de la actividad humana.
- **CS6 Impacto visual:** Se refiere a la integración del diseño del proyecto con el entorno creando armonía.
- **CS7 Desarrollo económica:** Se corresponde con los efectos económicos familiares que potencian o perjudican el bienestar cotidiano o el patrimonio de largo plazo
- **CS8 Facilidad de desplazamiento:** Se asimila a la influencia positiva o negativa en el desplazamiento de las personas de la comunidad. Accesos expeditos, emplazamientos cercanos a servicios, mejora o creación de accesos, son algunos casos.
- **CS9 Seguridad vial:** Se refiere a la reducción o aumento de los riesgos de accidentes de tránsito a causa del proyecto.
- **CS10 Incidencia ambiental:** Corresponde a la incidencia del proyecto en la mejora medio ambiental. Por ejemplo, usar sistemas de reciclaje para no eliminar desechos, usar medidas de mitigación del polvo producido durante algunos procesos, no usar maquinaria muy ruidosa durante horas específicas que puedan afectar a las personas del sector, entre otras.
- **CS11 Identidad:** Díganse de dar al sector o al proyecto un sello único que identifique a la comunidad para lograr un sentido de pertenencia y cultura.
- **CS12 Condiciones técnicas:** Se refiere al cumplimiento de las especificaciones del proyecto y del contrato para garantizar que sea apto para usar.

Criterios diferenciadores

- **CS13 Espacios de desarrollo familiar:** Corresponde a entregar espacios físicos que permitan el desarrollo individual y colectivo de la familia.
- **CS14 Alteración de servicios:** Refiérase a interrupciones de los servicios de agua, electricidad, gas u otros a consecuencia de los trabajos.

Actores de interés comunes

- **AI1 Mandante o promotor:** Es para quien se ejecuta la obra y es la institución que inyecta los recursos para que los trabajos se ejecuten.

- A12 *Ejecutores*: Corresponden a las empresas contratistas que llevan a cabo la ejecución física de los proyectos.
- A13 *Autoridades o representantes políticos*: Se corresponde con las personas elegidas democrática o selectivamente para representar los intereses comunitarios y ciudadanos, que influyen en la toma de decisión y la organización comunal.
- A 4 *Comunidad beneficiada*: Son las personas e instituciones que residen en los sectores intervenidos, estos que se benefician directamente por estos proyectos.
- A15 *Comunidad beneficiada indirectamente*: Son las personas que transitan o residen en las cercanías de los sectores intervenidos, en que el efecto del proyecto altera/mejora sus actividades rutinarias.
- A16 *Comercio local*: Se asocia a locales comerciales ubicados en las cercanías de los sectores intervenidos, que tienen como sustento los ingresos que reciben por el trabajo que realizan.
- A17 *Entidades de regulación*: Corresponde a las unidades administrativas municipales, regionales o ministeriales que regulan el adecuado funcionamiento u organización del uso de infraestructuras y desarrollo de los trabajos. (Ej. Autoridades de tránsito, inspección del trabajo, sanitarias u otras).
- A18 *Dirigentes sociales*: Son los dirigentes o instituciones enfocadas en canalizar y solucionar problemáticas de la comunidad, brindar protección y atención a quejas e inquietudes de la población.
- A19 *Diseñadores*: Se corresponde con la Consultora/Entidad encargada del diseño del proyecto.
- A10 *Inspección técnica*: Es el personal o entidad pública o privada que supervigila el adecuado desarrollo de los trabajos y resguarda el cumplimiento de las condiciones técnicas del proyecto durante su ejecución.

5.2 Nivel de impacto por criterio social CS en cada caso de estudio

Por medio de la aplicación de la encuesta se obtienen 100 respuestas completas en condición para ser procesadas. Cada encuesta indica el nivel de impacto que posee cada CS en los casos de estudio. La encuesta se procesa mediante el software SPSS Versión 21.0 y se usan tablas de contingencia, para obtener la frecuencia acumulada del nivel de impacto para cada criterio social en los casos de estudio. En las tablas de contingencia se cruzan las respuestas de la encuesta. En estas tablas se indica la cantidad de encuestados que seleccionaron cada nivel de impacto para los CS en los diferentes casos de estudio.

Los gráficos de dispersión que se muestran a continuación en la Figura 10 indica la distribución de las respuestas en los 5 niveles de impacto para cada CS en cada caso de estudio.

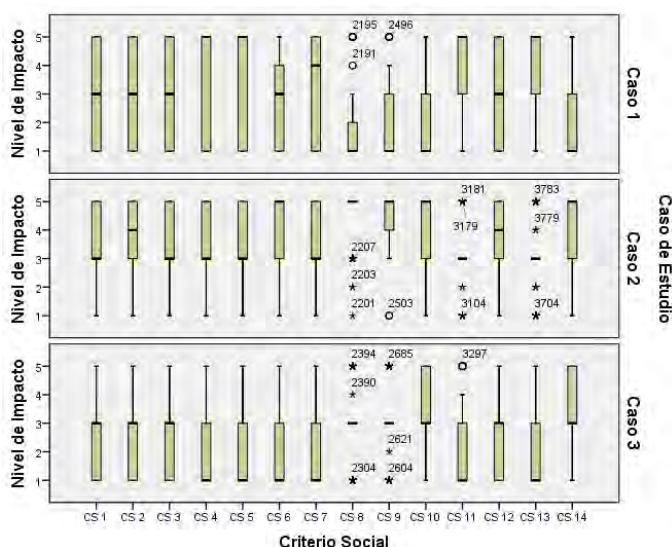


Figura 10. Gráfico de caja de cada CS y en los 3 casos de estudio

Esta distribución se representa con la caja que muestra el grafico, es decir, el largo de la caja indica entre que niveles de impacto se concentran las respuestas. Además, mediante una línea gruesa que marca el

ancho de la caja se indica la mediana de las respuestas, es decir, en qué nivel de impacto se encuentra la mayor cantidad de respuestas (50%). Por ejemplo, en el CS1 el gráfico muestra que en el Caso de Estudio 1 la mediana se encuentra en el nivel 2 y que las respuestas se concentran entre los niveles 1 y 4 presentando una menor tendencia a selecciones del nivel 5. En criterios diferenciadores como lo es el CS13 solo muestra la línea de la mediana la cual indica la mayor concentración de respuestas en cada Caso de Estudio. Aparte muestra los casos aislados que no seleccionan el nivel de impacto de la mediana pero que no son suficientes como para considerarlos como una caja que se concentra entre ciertos niveles de impacto.

Para el Caso de Estudio 1 este criterio tiene una mediana en el nivel 5 y existen algunos encuestados que aisladamente seleccionaron el nivel 4, 3 y 1. En el Caso de Estudio 2 se muestra una mediana en el nivel 4 (impacto intermedio) y respuestas aisladas para los demás niveles de impacto y para el Caso de Estudio 3 se muestra una mediana en el nivel 1 de impacto y selecciones en los niveles 2, 3 y 5. Este gráfico indica que el CS13 tiene un mayor grado de incidencia en el Caso de Estudio 1 y una menor incidencia significativa en el Caso de Estudio 3.

5.3 Grado de asociatividad y prioridad de CS

En la Etapa 2 se aplican análisis de Pruebas de Chi cuadrado y Prueba de Kendall. Estos análisis se aplican para la validación de las respuestas de la encuesta; y para verificar la consistencia de las variables y sus resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores estadísticos por criterio social

Criterio Social	CASOS DE ESTUDIO			W de Kendall	P Valor Kendall	P Valor Chi cuadrado
	Caso de estudio 1	Caso de estudio 2	Caso de estudio 3			
	Orden de Impacto (1 - 5)					
CS1: Opinión social	3,70	4,56	3,76	0,759	0,002	0,000
CS2: Valoración y reputación	3,48	4,64	3,88	0,787	0,001	0,000
CS3: Salud	4,38	4,10	3,54	0,847	0,021	0,000
CS4: Participación de actores de interés	4,54	4,32	3,14	0,742	0,000	0,000
CS5: Confortabilidad	4,40	4,36	3,24	0,808	0,000	0,000
CS6: Impacto visual	3,80	4,98	2,94	0,844	0,000	0,000
CS7: Desarrollo económico	4,50	4,42	3,08	0,759	0,003	0,000
CS8: Facilidad de desplazamiento	2,66	4,96	3,76	0,557	0,000	0,000
CS9: Seguridad vial	2,64	4,82	3,94	0,689	0,000	0,000
CS10: Incidencia ambiental	2,94	4,96	4,12	0,859	0,000	0,000
CS11: Identidad	4,94	4,12	2,56	0,888	0,001	0,000
CS12: Condiciones técnicas	3,68	4,76	3,58	0,607	0,002	0,000
CS13: Espacios de desarrollo familiar	4,86	4,20	2,74	0,688	0,001	0,070
CS14: Alteración de servicios	2,94	4,18	4,88	0,679	0,000	0,060

El primer análisis es aplicado a la tabla de contingencia que contiene los datos ordenados con el nivel de impacto seleccionado para cada caso de estudio. Se aplica para identificar si existe diferencia significativa entre el impacto de cada criterio social respecto de cada caso de estudio. El segundo análisis de Kendall se aplica para determinar la concordancia del orden de impacto en que los encuestados determinan para cada criterio respecto de cada caso de estudio.

La prueba Chi cuadrado arroja un valor 0 a 12 de los Criterios Sociales estableciendo que en estos criterios no existe una diferencia significativa en los niveles de impactos seleccionados, lo cual indica que no son diferentes los casos de estudio frente a estos criterios sociales. Para 2 de los CS, el de *Espacios de desarrollo familiar* y *Alteración de servicios*, se obtiene un p valor mayor a 0,05 lo que indica que existen una independencia entre los casos de estudio y que solo a alguno afecta el criterio o actor de interés evaluado. Los valores para cada CS del nivel de significancia de Chi cuadrado se muestran en las tablas. Además, se evidencia el nivel de concordancia que arroja el valor de la prueba de Kendall que es cercano a 1 por lo que existe una alta concordancia entre los encuestados respecto al nivel de impacto determinado para cada criterio social, los valores para cada CS entregados por esta prueba se muestran las tablas. Considerando

los criterios en que Chi cuadrado no determina una diferencia significativa Kendall define una tendencia concordante pero que no determina una diferencia significativa respecto de un criterio si aplica a una obra o no. Pero sí si se aplica en un grado mayor o menor.

5.4 Reducción de factores: Criterios sociales

Se aplica un análisis factorial para asociar grupos de criterios sociales por Caso de Estudio. De esta forma se explora los grados de comunalidad entre criterios. Los grupos de CS se presentan a continuación.

A partir de las preferencias para el Caso de Estudio 1 y el análisis factorial de la Tabla 10 se presentan las cargas factoriales con ejes rotados VARIMEX. Por cada columna de la Tabla 10 se destacan los Criterios Sociales asociados a cada componente (grupo factorial).

Tabla 10. Grupos de criterios sociales para el Caso de Estudio 1

Matriz de componentes					
	Componente				
	1	2	3	4	5
CS1: Opinión social	0,665	-0,254	-0,270	-0,145	-0,175
CS2: Valoración y reputación	0,685	-0,329	-0,186	-0,016	-0,125
CS3: Salud	0,490	0,031	-0,259	-0,461	0,310
CS4: Participación de actores de interés	0,463	-0,420	0,008	0,194	0,589
CS5: Confortabilidad	0,463	-0,406	0,169	-0,107	-0,120
CS6: Impacto visual	0,483	0,007	0,282	0,331	0,508
CS7: Desarrollo económico	0,502	0,060	0,342	-0,419	-0,232
CS8: Facilidad de desplazamiento	0,513	0,412	-0,301	0,028	0,218
CS9: Seguridad vial	0,413	0,669	-0,164	-0,249	0,125
CS10: Incidencia ambiental	0,484	0,526	-0,174	0,216	-0,231
CS11: Identidad	0,285	0,258	0,666	0,099	-0,081
CS12: Condiciones técnicas	0,574	-0,318	-0,156	0,121	-0,371
CS13: Espacios de desarrollo familiar	0,447	0,066	0,622	-0,152	-0,017
CS14: Alteración de servicios	0,450	0,148	-0,063	0,662	-0,230

A partir de las preferencias para el Caso de Estudio 2 y el análisis factorial de la Tabla 11 se presentan las cargas factoriales con ejes rotados VARIMEX. Por cada columna de la Tabla 11 se destacan los Criterios Sociales asociados a cada componente (grupo factorial). En los siguientes puntos se describen las características asociadas a cada grupo factorial.

Tabla 11. Grupos de criterios sociales para el Caso de Estudio 2

Matriz de componentes					
	Componente				
	1	2	3	4	5
CS1: Opinión social	0,550	0,073	0,360	-0,047	0,420
CS2: Valoración y reputación	0,690	0,318	0,043	-0,024	-0,047
CS3: Salud	0,325	0,340	0,540	-0,069	-0,268
CS4: Participación de actores de interés	0,512	0,026	-0,102	0,597	-0,163
CS5: Confortabilidad	0,699	0,037	0,129	0,041	0,168
CS6: Impacto visual	0,427	0,309	0,165	0,593	0,160
CS7: Desarrollo económico	0,093	0,816	0,118	0,086	0,003
CS8: Facilidad de desplazamiento	0,310	0,553	0,056	0,027	0,511
CS9: Seguridad vial	0,056	0,108	0,092	0,046	0,824
CS10: Incidencia ambiental	-0,290	0,565	0,426	0,292	0,126
CS11: Identidad	-0,206	0,028	0,097	0,799	0,062
CS12: Condiciones técnicas	0,295	0,139	0,683	-0,006	0,030
CS13: Espacios de desarrollo familiar	0,187	0,580	0,042	0,015	0,105
CS14: Alteración de servicios	-0,098	0,005	0,726	0,183	0,280

A partir de las preferencias para el Caso de Estudio 3 y el análisis factorial de la Tabla 12 se presentan las cargas factoriales con ejes rotados VARIMEX. Por cada columna de la Tabla 12 se destacan los Criterios Sociales asociados a cada componente (grupo factorial).

Tabla 12. Grupos de criterios sociales para el Caso de Estudio 3

Matriz de componentes				
	Componente			
	1	2	3	4
CS1: Opinión social	0,174	0,022	0,193	0,751
CS2: Valoración y reputación	0,549	-0,002	-0,068	0,605
CS3: Salud	0,087	0,134	0,352	0,408
CS4: Participación de actores de interés	0,626	0,070	0,013	0,108
CS5: Confortabilidad	0,592	0,316	0,003	0,248
CS6: Impacto visual	0,609	0,009	0,257	-0,244
CS7: Desarrollo económico	0,284	0,553	0,350	-0,121
CS8: Facilidad de desplazamiento	0,047	0,041	0,828	0,184
CS9: Seguridad vial	0,079	0,162	0,826	0,046
CS10: Incidencia ambiental	0,087	0,705	0,095	0,195
CS11: Identidad	0,160	0,788	0,052	0,017
CS12: Condiciones técnicas	0,565	0,052	0,075	0,178
CS13: Espacios de desarrollo familiar	0,613	0,457	0,062	-0,003
CS14: Alteración de servicios	-0,315	0,450	0,015	0,480

6. DISCUSIÓN

A partir de los resultados de este estudio se determina que los criterios sociales estudiados se relacionan con los tres casos de estudio. Los criterios sociales se vinculan a una etapa del ciclo de vida de la infraestructura considerando a [35] que dicta que la sostenibilidad social se debe abordar para obtener mejores beneficios primero durante las fases de planificación y diseño y es importante considerarlos durante las etapas de construcción y posterior operación. El ciclo de vida se compone de la etapa de diseño y planificación, la etapa de construcción y la etapa de operación [36].

En la etapa de diseño se encuentran los criterios de participación de actores de interés, impacto visual, identidad y espacios de desarrollo familiar. Respecto a la incidencia seleccionada por los encuestados para los criterios sociales de esta etapa, para los criterios de participación de actores de interés, identidad y espacios de desarrollo familiar la mayoría indicó que presentan un grado más alto de incidencia en el Caso de Estudio 1. La vinculación de estos criterios a la etapa de diseño y planificación con una mayor incidencia en una infraestructura habitacional se asimila a lo señalado por [37, 17] que centran sus estudios en un proyecto similar al Caso de Estudio 1 (Habitabilidad rural) estudiado en este trabajo.

El mayor impacto de estos criterios se debe a las características de la infraestructura ya que la participación de la comunidad es un factor importante al tratarse de personas que pertenecen a una cultura significativa que posee sus propias creencias. Siguiendo en esta línea con relación al diseño de las viviendas es importante que se mantenga la identidad de la cultura del sector y que se integren espacios dentro de la vivienda donde los habitantes se puedan desenvolver y compartir. El criterio de impacto visual tiene un mayor grado de impacto en el Caso de Estudio 2, ya que la mayoría de los encuestados lo seleccionó en este nivel.

En la etapa de construcción se relaciona mayoritariamente a los criterios de *opinión social, salud, confortabilidad, desarrollo económico, seguridad vial, incidencia ambiental, condiciones técnicas y alteración de servicios*. [38] dicta que la incidencia ambiental o el medio ambiente y la seguridad debe ser considerada en la etapa de diseño y planificación y también en la etapa de construcción, a diferencia de este estudio que solo vincula estos aspectos a la etapa de construcción. La diferencia se debe a que el criterio de incidencia ambiental y seguridad vial fueron definidos apuntando a los impactos producidos en el medio ambiente netamente provocados durante la construcción de la infraestructura y en como la seguridad vial se verá afectada durante esta fase. Esta etapa es donde se producen la mayor cantidad de procesos que pueden afectar negativamente al sector y a la comunidad de donde se construye la infraestructura, por lo que concentra una cantidad importante de criterios sociales a considerar.

En relación al grado de impacto, los encuestados estiman que los criterios de *opinión social, seguridad vial, incidencia ambiental y condiciones técnicas* tienen un mayor impacto en el Caso de Estudio 2 (Mejoramiento

de Av. Pedro de Valdivia) ya que al tratarse de una infraestructura de gran envergadura y de interés para la comunidad, la opinión que se genere respecto de la forma en que se ejecutan los trabajos, los efectos en el desarrollo económico y la confortabilidad se vuelven factores importantes de considerar. La no consideración de estos elementos puede causar disconformidad en la comunidad y esto conlleva a la generación de conflictos sociales como los señalados por [9] que también considera que las infraestructuras de transporte (vial) son las que generan más conflictos en América Latina.

Además, *la seguridad vial, la incidencia ambiental y las condiciones técnicas* en una obra vial con las características del Caso de Estudio 2 trascienden. Una inadecuada ejecución de los trabajos, el mal manejo de los desechos puede causar contaminación al medio ambiente y la incorrecta coordinación del tránsito puede desencadenar accidentes que empañan el propósito de la infraestructura.

La alteración de servicios fue seleccionada con el mayor impacto en el Caso de Estudio 3 ya que al tratarse de una infraestructura sanitaria donde se instalará un nuevo colector de aguas lluvias se interrumpe la distribución de los servicios de agua potable y alcantarillado ya que la ejecución de los trabajos de la infraestructura sanitaria interseca con los elementos de distribución de los servicios mencionados. Además, el tránsito se ve afectado ya que se deben cerrar completamente las calles que deben ser intervenidas debido a la instalación del nuevo colector creando atochamientos vehiculares y desvíos que afectan negativamente el desplazamiento de los vehículos y peatones.

En la etapa de operación se encuentran los criterios sociales de *opinión social, valoración y reputación, confortabilidad, desarrollo económico, facilidad de desplazamiento, seguridad vial e incidencia ambiental*. En esta etapa se encuentran principalmente los CS relacionados con la aceptación y opinión que genera la infraestructura terminada además de los beneficios o perjuicios que tienen para la comunidad que la rodea y utiliza. La selección de los criterios sociales en la etapa de operación se asemeja a lo establecido por [39, 40] que hacen alusión a criterios relacionados con el crecimiento económico en la etapa de operación de una infraestructura habitacional, además [22] indica que la seguridad y la inclusión relacionada con el desplazamiento y los espacios de una infraestructura habitacional debe ser considerada durante la etapa de operación, asimismo [41] se refiere en su investigación a que criterios relacionado con los accesos (facilidad de desplazamiento) se deben considerar en la operación de la infraestructura.

Según los encuestados el nivel de impacto de los CS de *opinión social, valoración y reputación, facilidad de desplazamiento, seguridad vial e incidencia ambiental* tienen un mayor impacto en el Caso de Estudio 2. El mayor impacto en el Caso de Estudio 2 se debe a que esta obra despierta en la comunidad interés y expectativas por el ciclo de vida de uso. Es decir, la comunidad verifica las expectativas de diseño y dependiendo del nivel de satisfacción se generan diferentes valoraciones que repercuten en un beneficio o perjuicio sobre los encardados de la obra, dígase los ejecutores o mandante.

Además de las opiniones que genere el proyecto terminado se debe considerar las consecuencias que trae su utilización. Dicho de otra manera, se debe considerar el aporte al desplazamiento de la comunidad, la comodidad y seguridad que entrega la infraestructura y el impacto que tiene sobre el medio ambiente durante su etapa de operación

Por otro lado, los criterios de *confortabilidad y desarrollo económico* tienen un mayor impacto según los encuestados en el Caso de Estudio 1. La confortabilidad que entreguen las viviendas es una característica que se considera en el sentido de dignidad que se entrega a la familia que la habita. Por ende, se debe entregar lo necesario para mejorar la calidad de vida y aportar al entorno que la rodea. El nivel de impacto sobre el desarrollo económico en el Caso 1 (Habitabilidad Rural) se relaciona con el hecho de que la construcción de nuevas viviendas crea la posibilidad de nuevos emprendimientos y el fomento de los existentes. Los proyectos habitacionales traen consigo nuevas familias que vivirán en el sector y cabe la posibilidad que se generen intercambios económicos entre los vecinos.

La creación de nuevos almacenes u otro tipo de emprendimiento mejorará la circulación económica de los miembros de la comunidad. La consideración de este criterio en una infraestructura habitacional (Caso de Estudio 1) se practica y vincula a [42] que establece que en una infraestructura de ese tipo y su entorno no

solo existen dificultades relacionadas con la habitabilidad y la eficiencia energética, sino que también problemas relacionados en la falta de oportunidades económicas y el desempleo. Por esto es por lo que la sostenibilidad debe considerar y entrelazar aspectos económicos y sociales.

Los criterios sociales identificados en este estudio se pueden agrupar por similitud en grupos más grandes. Esta agrupación de criterios es útil si se necesita evaluar una infraestructura con menos criterios sociales pero que consideren los aspectos más relevantes. Por ejemplo, para el Caso de Estudio 1 se encontraron 4 grupos considerables. El primer grupo incluye los criterios que apuntan a la valoración de los aspectos técnicos de la infraestructura, el segundo se centra en los riesgos que genera la ejecución del proyecto, el tercer grupo se enfoca en el diseño y el cuarto se basa en la participación.

Mediante esta distribución de criterios sociales se acorta la lista lo cual hace más fácil y rápido la evaluación de este tipo de infraestructuras y no se deja de lado ningún aspecto importante que deba ser evaluado. La distribución o agrupamiento de los criterios sociales es similar para los 3 Casos de Estudio ya que los criterios sociales estudiados son los mismos. Es decir, que los grupos creados por el agrupamiento pueden ser aplicados a los 3 tipos de infraestructura.

Cabe destacar que, aunque se agrupen los criterios de manera similar y además de la relevancia del criterio social su definición cambiará según el contexto lo cual lo transformará según el tipo de infraestructura en indicadores específicos de desempeño. No se debe olvidar que cada infraestructura posee un sinnúmero de aspectos a considerar al momento de realizar su evaluación social. Por ejemplo, los Casos de Estudio analizados pertenecen a la misma región geográfica, pero todos tienen particularidades que los hacen diferentes unos con otros.

7. CONCLUSIONES

A través del cumplimiento del objetivo de este trabajo que determina la incidencia de criterios sociales en tres diferentes tipos de infraestructura se obtiene una lista de criterios de sostenibilidad. Esta lista es la base para la inclusión de la sostenibilidad social en la evaluación y planificación de las infraestructuras y es adaptable para el contexto en el que se implemente.

Los hallazgos de este estudio pueden ser aplicados por entidades públicas como Municipalidades, MOP, MINVU y SERVIU en Chile. La sostenibilidad debe dejar de enfocarse solo en el ámbito ambiental y el estudio de la sostenibilidad social en el área de la construcción es un gran paso para abrir el tema e integrar el concepto de sostenibilidad social cada vez más en las futuras generaciones y en la práctica habitual.

Futuras investigaciones deberán enfocarse en perfeccionar la lista creada estudiando otros tipos de infraestructuras para ampliar el alcance de los criterios sociales y actores de interés identificados en este trabajo. Asimismo, se deberá utilizar una muestra de mayor tamaño para la validación de los criterios sociales y actores de interés.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) del Gobierno de Chile a través del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt - INI) proyecto No. 11190501.

REFERENCIAS

- [1] Brundtland G. (1987). El desarrollo sostenible: informe de la comisión mundial sobre el medio ambiente y desarrollo. Asamblea general de las Naciones Unidas.
- [2] Díaz J. et al. (2016). Evaluation of existing sustainable infrastructure rating systems for their application in developing countries. *Ecological Indicators* 71, 491- 502.
- [3] Casanovas M. et al. (2020). Minimizing the social impact of construction work on mobility: a decision-making method. *Sustainability* 12(3), 1183.
- [4] Umaña L. (2020). Manejo de conflictos sociales en proyectos de infraestructura: utilidad social. Recuperado: <https://www.energiaestrategica.com/manejo-de-confli-sociales-en-proyectos-de-infraestructura-utilidad-social/>

- [5] Henríquez B. y Gonzáles D. (2018). Análisis de actores e impactos sociales involucrados en el proyecto de mejoramiento Av. Pedro de Valdivia entre Av. Orbital y Prieto Norte. Chile.
- [6] Jome M. y Ebrahimi A. (2015). Measuring and evaluating of the principles of social sustainability in residential buildings. *Urban social studio* 5(16), 1-30.
- [7] Tapella E. (2007). El mapeo de actores claves, documento de trabajo del proyecto efectos de la biodiversidad funcional sobre procesos ecosistémicos, servicios ecosistémicos y sustentabilidad en las Américas: Un abordaje interdisciplinario. Universidad nacional de Córdoba, Inter-American institute for global change research (IAI).
- [8] Bal M. et al. (2013). Stakeholder engagement: Achieving sustainability in the construction sector. *Sustainability* 5 (2), 695-710.
- [9] Watkins G. et al. (2017). Lecciones de cuatro décadas de conflicto en torno a los proyectos de infraestructura en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo.
- [10] Ramos E. y Pérez G. (2018). Desarrollo y conflictos asociados a la construcción de infraestructura. *Boletín FAL* 361(1), 8-14.
- [11] Montenegro V. (2014). El conflicto social en la fase de ejecución de proyectos de generación eléctrica: elementos teóricos para una propuesta de viabilidad social. *Revista ABRA* 34 (48), 19-42.
- [12] Perdomo J. y Varela J. (2015). Metodología para la medición de riesgos sociales. *Paradigmas* 7(1).
- [13] Domínguez A. y Díaz J. (2007). Las infraestructuras terrestres: Instrumento para la integración de las áreas periféricas en el resto del territorio. Universidad de Cantabria.
- [14] Sierra L. et al. (2018). A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production* 187, 496-513.
- [15] Fitoussi J. y Malik K. (2013). Choices, capabilities, and sustainability. Human development report office. Occasional paper.
- [16] Nóbrega A. et al. (2020). Community Involvement in the Implementation of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS): The Case of Bon Pastor, Barcelona. *Sustainability* 12(2), 510.
- [17] Abed A. (2017). Assessment of social sustainability: a comparative analysis. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning* 170 (2), 72-82.
- [18] Karji A. et al. (2017). Social Sustainability Indicators in Mass Housing Construction. *Architectural Engineering -- Faculty Publications* 127, 1-9.
- [19] Sierra L. et al. (2021). An evaluation framework of social sustainability for public housing projects assessment in Chile. 25th International Congress on Project Management and Engineering. Alcoi. España.
- [20] Whang S. y Kim S. (2015). Balanced sustainable implementation in the construction industry: The perspective of Korean contractors. *Energy and Buildings* 96, 76-85.
- [21] Bramley G. et al. (2009). Social Sustainability and Urban Form: Evidence from Five British Cities. *Environment and Planning A: Economy and Space* 41(9), 2125-2142.
- [22] Fatourehchi D. y Zarghami E. (2020). Social sustainability assessment framework for managing sustainable construction in residential buildings. *Journal of Building Engineering* 32, 101761.
- [23] Gibberd J. (2002). The sustainable building assessment tool assessing how buildings can support sustainability in developing countries. *Built Environment Professions Convention* 1-3.
- [24] Axelsson R. et al. (2013). Social and Cultural Sustainability: Criteria, Indicators, Verifier Variables for Measurement and Maps for Visualization to Support Planning. *AMBIO* 42, 215-228.
- [25] Zamojska A. y Próchniak J. (2017) Measuring the social impact of infrastructure projects: The Case of Gdańsk International Fair *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation* 13(4), 25-42.
- [26] Bahadorestani A. et al. (2020). Planning for Sustainable Stakeholder Engagement Based on the Assessment of Conflicting Interests in Projects. *Journal of Cleaner Production* 242, 118402.
- [27] Azuero D. (2009). La comunicación de la RSE. Propuestas para un modelo de comunicación responsable. Forética.
- [28] Navarro F. (2008). Responsabilidad social corporativa: Teoría y práctica. ESIC Editorial.
- [29] Yepes V. (2014). ¿Cuántos actores existen en el proceso proyecto-construcción? Recuperado: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/06/09/actores-proceso-proyecto-construccion/>
- [30] Cañadas G. et al. (2016). Las tablas de contingencia: Algunas ideas para el aula. En XVI Congreso de enseñanza y aprendizaje de las matemáticas.
- [31] Ruiz L. (2019). Prueba de chi-cuadrado (χ^2): Qué es y cómo se usa en estadística. Recuperado: <https://psicologiamente.com/miscelanea/prueba-chi-cuadrado>
- [32] Ramírez A. y Polack A. (2020). Estadística inferencial. Elección de una prueba estadística no paramétrica en investigación científica. *Horizonte de la Ciencia* 10(19), 191-208.
- [33] Montesino Y. (2012). Manual de métodos multicriterio para la toma de decisiones. Trabajo de grado. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- [34] De la Fuente S. (2011). Análisis factorial. Universidad Autónoma de Madrid.
- [35] Valdes R. y Klotz L. (2010). Considering social dimensions of sustainability during construction project planning and design. *International Journal of Environmental* 6(6), 167-180.
- [36] Pellicer E. et al. (2014). *Construction management*. Wiley.

- [37] Durdyev S. et al. (2018). Sustainable construction industry in Cambodia: Awareness, drivers, and barriers. *Sustainability* 10(2), 392.
- [38] Gambatese J. y Rajendran S. (2005). Sustainable roadway construction: energy consumption and material waste generation of roadways. En *Construction research congress 2005: Broadening perspectives*.
- [39] Sharifi A. y Murayama A. (2013). A critical review of seven selected neighborhood sustainability assessment tools. *Environmental impact assessment review* 38, 73-87.
- [40] Zhang X. (2011). Social risks for international players in the construction market: A China study. *Habitat International* 35(3), 514-519.
- [41] Ahmad T. y Thaheem M. (2017). Developing a residential building-related social sustainability assessment framework and its implications for BIM. *Sustainable cities and society* 28, 1-15.
- [42] Orduña M. (2016). *Barrios y sostenibilidad: La aplicación de criterios sociales, medioambientales y económicos en el diseño y evaluación de procesos de regeneración urbana sostenible en ciudades europeas*. Disertación doctoral. Universidad de Valladolid.

Relación de criterios de contribución a la sostenibilidad social de aditivos asfálticos innovados y en uso

Ricardo López Altamirano¹
María Jesús Osses Osses²
Leonardo Sierra Varela³
Universidad de La Frontera
Chile

Del proceso de reciclaje del Neumático Fuera de Uso NFU se obtiene caucho, acero y fibra textil FTNFU. Los dos primeros tienen una salida comercial, pero la FTNFU es actualmente un desecho que llega a vertedero, ocupando un espacio y generando riesgo de incendio. Debido a esto se encuentra en desarrollo el proyecto para desarrollar un aditivo granulado en base a FTNFU para mejorar propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas convencionales y utilizarlas para la fabricación de mezclas tipo SMA, reemplazando los aditivos actuales (fibra de celulosa). Este proyecto busca generar una contribución a la sostenibilidad y, para ello, no solo se consideran los aspectos técnicos, económicos y ambientales, sino también los aspectos sociales. Para lograrlo se deben identificar los criterios e indicadores diferenciadores para la evaluación social de aditivos asfálticos innovados y en uso, en las etapas de extracción y producción. Junto con ello, se busca visualizar la relación de criterios de la contribución social para aditivos asfálticos innovados y en uso. Los indicadores sociales relacionados con el uso de fibras en mezclas asfálticas se identificaron mediante triangulación de información proveniente de diversas fuentes. Una vez identificados se construyó un modelo de evaluación a través un Mapa Cognitivo Difuso MCD, para visualizar las interacciones entre estos aspectos en la actualidad y a largo plazo. Los indicadores sociales de mayor relevancia corresponden al aporte técnico, cantidad de aditivo necesario y certificaciones. Este trabajo es un aporte para la evaluación social de fibras para mezclas asfálticas, sin embargo, la metodología empleada podría aplicarse en otros estudios de evaluación social.

¹ Ingeniero Constructor y Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

Contacto: *r.lopez02@ufromail.cl*

² Ingeniera Constructora y Licenciada en Ciencias de la Ingeniería.

Contacto: *m.osses03@ufromail.cl*

³ Doctor en Ingeniería de la Construcción.

Contacto: *leonardo.sierra@ufrontera.cl*

1. INTRODUCCIÓN

En Chile, los pavimentos asfálticos son el tipo de solución más usada a nivel nacional, con una cobertura del 88% de la red total pavimentada [1]. En ocasiones, ya sea por exigencia técnica o para mejorar alguna propiedad del pavimento; se le agregan a esta mezcla aditivos. Estos generalmente son en formato de fibra, las que pueden ser sintéticas (poliolefina, aramida, fibra de vidrio, entre otras) o naturales (fibra de celulosa).

Generalmente, un pavimento asfáltico modificado con fibra tiene un mayor costo que un pavimento tradicional. Debido a esto, se ha buscado utilizar fibras alternativas y que a su vez sean sostenibles para reemplazar las ya existentes. Una de ellas es la Fibra Textil de Neumático Fuera de Uso FTNFU, la cual proviene del proceso de reciclaje de Neumáticos Fuera de Uso NFU.

Esta fibra posee diversos efectos en el medioambiente y en la salud de las personas, pues su destino actual es llegar a un vertedero o ser usada como combustible en plantas cementeras. Ambos usos tienen un impacto negativo para la sociedad, debido a que la quema de esta fibra libera gases tóxicos a la atmósfera. Por otro lado, en un vertedero ocupa un gran espacio, existiendo también un riesgo de incendio y además es un posible foco de enfermedades e infecciones [2].

En este contexto, se está desarrollando el proyecto de investigación *FibraTyre – Desarrollo de aditivo en base a FTNFU para mezclas asfálticas sustentables ambientalmente* FONDEF ID 20110160, que busca crear un aditivo granulado en base a FTNFU para mejorar propiedades mecánicas en las MAC, y ser utilizado para la fabricación de mezclas tipo Stone Mastic Asphalt SMA. De esta forma, se busca reemplazar los aditivos actuales (fibra sintética y fibra de celulosa, respectivamente), contribuyendo a la solución de la problemática socio ambiental actual mediante la valorización de las FTNFU.

Uno de los objetivos del desarrollo de este aditivo es que sea sostenible. Es decir, que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades [3]. El desarrollo sostenible se compone de tres pilares: económico, social y medioambiental [4].

En las últimas décadas se ha tomado mayor interés en el pilar económico y recientemente se ha considerado el pilar ambiental. Sin embargo, un diseño sostenible apropiado requiere la consideración de cada una de las tres dimensiones en las que se basa la sostenibilidad [5]. La sostenibilidad social se consigue cuando se apoyan proyectos en el mantenimiento de la unión comunitaria para el cumplimiento de objetivos comunes por mejorar las condiciones de vida [6].

En este contexto, se han realizado limitados estudios respecto a la sostenibilidad social en la construcción en general, menos aún para el desarrollo de nuevos materiales a usar en la industria. La razón de esto es que existe una limitación del acceso a la información y bases de datos para cubrir los aspectos sociales [7]. Es por esta limitación que algunas investigaciones definen criterios reduccionistas y no consideran el contexto de aplicación, ni la participación.

De esta manera, la dimensión social ha sido comúnmente reconocida como el pilar más débil y el menos desarrollado del concepto de sostenibilidad [8]. La sostenibilidad social presenta retos diferentes y más complicados de cara a su especificación, comprensión y comunicación que los presentados por la sostenibilidad medioambiental. Además, no existe una base científica comúnmente aceptada para el análisis o una unidad de medida común, como sí ocurre en la dimensión económica de la sostenibilidad [9].

Cabe destacar que la no consideración de aspectos sociales, provocará efectos perjudiciales que repercutirán sobre la calidad de vida de las generaciones futuras [10]. El proyecto FibraTyre es una oportunidad perfecta para darle mayor relevancia a la sostenibilidad social. Generalmente, cuando se evalúan materiales en desarrollo se considera su contribución ambiental, técnica y económica, dejando de lado la contribución social que generan estas innovaciones. La literatura científica relacionada a lo social y el aporte de componentes derivados de FTNFU para infraestructura caminera es escasa.

Por las razones mencionadas es necesario la aplicación de una metodología que permita Identificar los criterios e indicadores diferenciadores para la evaluación social de aditivos asfálticos innovados y en uso, en las etapas de extracción y producción. Además, la visualización de la relación de criterios de la contribución social para aditivos asfálticos innovados y en uso. En las siguientes subsecciones se presentan la metodología empleada, los resultados y las conclusiones obtenidas en esta investigación.

2. MÉTODO

Cada objetivo específico marcó una etapa de la investigación. De esta manera, se utilizó un método para desarrollar cada etapa. La Figura 1 expone de manera resumida la metodología empleada para lograr cada objetivo, y en consecuencia lograr el objetivo general.

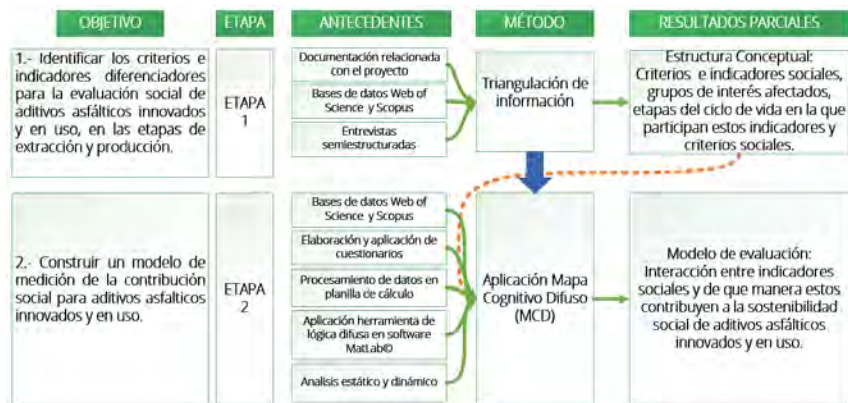


Figura 1. Proceso metodológico

Las etapas metodológicas incluyen antecedentes e insumos que fue necesario revisar o emplear para nutrir cada proceso y método. En el desarrollo de la primera etapa se realizó la triangulación de la información proveniente de tres fuentes disponibles para esta investigación: 1) literatura relacionada con la temática de estudio, 2) documentación técnica del proyecto, y 3) especialistas relacionados con el proyecto de investigación.

Gracias a la exploración de las dos primeras fuentes se establece una base argumentada y conceptual para aplicar entrevistas semiestructuradas a los especialistas. Los temas tratados en las entrevistas fueron los aspectos sociales que los entrevistados relacionan con los aditivos en base a fibras para MAC y para mezclas SMA. Las etapas consideradas en el ciclo de vida de este estudio son: Extracción de FTNFU, producción de aditivo y producción de mezcla.

En el contexto de las técnicas empleadas para el procesamiento de este estudio uno de los principales implementados son los Mapas Cognitivos Difusos MCD. Tras la obtención de los criterios e indicadores sociales validados para este trabajo se establece un modelo de evaluación de la contribución social de fibras para MAC y SMA. Sin embargo, socialmente los criterios e indicadores presentan interacciones y pesos que se deben determinar para establecer los parámetros de la evaluación. De esta forma, el MCD puede ayudar a establecer los pesos estáticos y dinámicos tras un proceso de interacción de criterios e indicadores.

Los MCD, son técnicas de computación blanda que combinan lógica difusa y redes neuronales [11]. Es una herramienta con numerosas ventajas comparativas, como por ejemplo simplificar un entorno de decisión complejo al tiempo que integra las diferentes perspectivas e ideas de los actores mediante un enfoque semicuantitativo [12]. Este método permite lidiar con la complejidad, con la información vaga y con características de incertidumbre. La Figura 2 presenta un ejemplo de MCD de manera gráfica.

Un MCD se compone por nodos que indican las características, propiedades o factores principales del sistema que se está modelando. Cada nodo tiene un valor difuso inicial y un rango entre (-1,1) que es determinado por los especialistas. Los nodos se interconectan a través de bordes que se etiquetan con valores difusos entre (-1,1) o (0,1). Esto representa la relación causal entre los conceptos con un grado de causalidad [13].

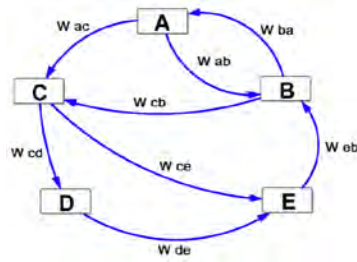


Figura 2. Mapa Cognitivo Difuso

Existen dos análisis que se deben realizar a un MCD: 1) *el análisis estático*, el cual presenta como objetivo la determinación de los nodos más importantes del MCD o la selección de los conceptos en que se va a intervenir [14]. Uno de los métodos para realizar un análisis estático es el de la centralidad de los nodos. La centralidad conceptual del nodo C_i se denota por $CEN(C_i)$ y se define por la ecuación (1). Luego, los elementos que componen la ecuación son definidos por la ecuación (2) y la ecuación (3) [13].

$$CEN(C_i) = IN(C_i) + OUT(C_i) \quad (1)$$

$$IN(C_i) = \sum_{k=1}^n w_{ik} \quad (2)$$

$$OUT(C_i) = \sum_{k=1}^n w_{ki} \quad (3)$$

Donde: w_{ik} y w_{ki} son los pesos de los bordes causales. $IN(C_i)$ representa la suma de todos los pesos que impactan al nodo C_i . Por otro lado, $OUT(C_i)$ representa la suma de todos los pesos a los que impacta el nodo C_i [13].

2) *el análisis dinámico*, que brinda información sobre el grado de dependencia y relaciones entre los conceptos o nodos. Este estudio sirve para analizar escenarios hipotéticos y como es su evolución en el tiempo. Un MCD dinámico produce respuestas diferentes con la excepción de algunos resultados que se producen periódicamente [14].

Un MCD que consta de n conceptos se representa matemáticamente por un n vector de estado A , que reúne los valores de los n conceptos y por una matriz E ponderada $n \times n$. Cada elemento E_{ij} de la matriz indica el valor de los pesos entre los conceptos C_i y C_j [15]. Se supone que ningún concepto se causa a sí mismo. Por lo tanto, la diagonal de la matriz se pone a 0 [16]. En cada momento, se calcula el valor A_i de cada concepto C_i , resumiendo las influencias de todos los demás conceptos sobre este y aplastando el impacto global mediante una función barrera f , según la ecuación (4) [17].

$$A_i^{t+1} = f(A_i^t + \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ji} \times A_j^t) \quad (4)$$

Donde A_i^{t+1} corresponde al valor del concepto C_i en el paso de simulación $t+1$. A_i^t es el valor del concepto C_i . A_j^t corresponde al valor del concepto C_j en el tiempo t . W_{ji} es el peso de la interconexión desde el concepto C_j al concepto C_i . Finalmente, la ecuación (5) muestra la función umbral sigmoide [18].

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-\lambda x}} \quad (5)$$

En este caso, el parámetro λ controla la pendiente de la curva [17]. El proceso de inferencia MCD finaliza cuando se alcanza la estabilidad. El último vector de estado muestra el efecto del cambio en el valor de cada nodo sobre el MCD [19]. Luego de completar el proceso de MCD el modelo puede converger a un punto fijo de equilibrio, a un punto caótico o a un comportamiento de ciclo límite [20].

Los datos necesarios para aplicar el MCD fueron recogidos a través de una encuesta denominada *Relación entre indicadores sociales* mediante la plataforma QuestionPro. El objetivo de esta encuesta fue obtener el grado de influencia entre los indicadores según la opinión de diversos especialistas que pertenecen a los grupos de interés relacionados con el proyecto. El público objetivo de esta encuesta debe cumplir un perfil definido que hace muy limitada la cantidad de encuestados.

La encuesta se compuso de 16 preguntas, donde cada pregunta se corresponde con un indicador social. En la encuesta se les pidió a los especialistas que indiquen el nivel de influencia que tiene cada indicador con todos los demás. Se usaron las variables lingüísticas *Muy Bajo*, *Bajo*, *Medio Alto* y *Muy Alto*. Para transformar las respuestas lingüísticas obtenidas en la encuesta fue necesario aplicar un Sistema de Inferencia Borroso SIB. Un SIB se define como un sistema experto con razonamiento aproximado que mapea un vector de entradas a una salida única (escalar) [21].

2.1 Caso de estudio

El caso de estudio consiste en dos evaluaciones de aditivo granular en base a FTNFU. La primera considera su uso en MAC y la segunda en mezclas SMA. La Figura 3 presenta las mezclas en evaluación con las respectivas fibras y la proporción analizada en cada caso.

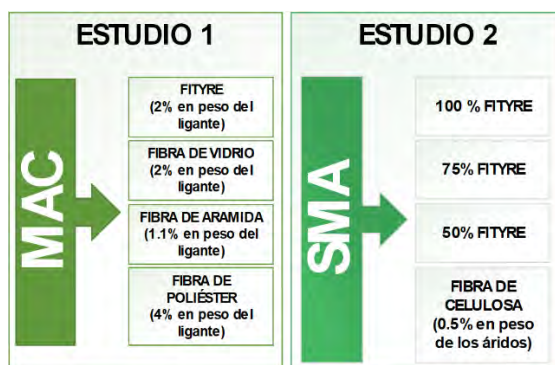


Figura 3. Fibras a comparar en el caso de estudio

En la primera evaluación se compara el aditivo en desarrollo llamado FiTyre (procedente de FTNFU) con tres fibras en uso en el mercado actual: 1) fibra de vidrio, 2) fibra de aramida, y 3) fibra de poliéster. Los aditivos se adicionan en peso del ligante, que para el caso del aditivo Fityre y para la fibra de vidrio corresponde a un 2%. Por otro lado, la fibra de poliéster se adicionará en un 4% y la fibra de aramida en un 1,1%.

En una segunda evaluación se considera el uso en mezclas SMA empleadas en rutas de elevado tránsito, tránsito pesado y zonas de pendiente fuerte. En este caso se evaluarán porcentajes de reemplazo del aditivo Viatop© 66 por FiTyre. El aditivo Viatop© 66 es un aditivo en base a fibra orgánica recubierta de betún [22]. Por otro lado, el aditivo Fityre corresponde al pellet en base a FTNFU recubierto de una emulsión asfáltica y desarrollado para su uso en mezclas SMA [23]. La proporción de aditivo Viatop© 66 usada en la mezcla de referencia para este estudio es de un 0,5% en peso de los áridos. La comparación consiste en reemplazar el 100%, 75% y 50% del aditivo Viatop© 66 por la fibra en desarrollo FiTyre.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Gracias a la metodología empleada, se concretan los resultados parciales y consecutivos correspondientes con cada etapa del proceso de investigación. A partir de la primera etapa se obtiene la estructura conceptual de criterios e indicadores sociales de evaluación. En la segunda etapa se concreta el modelo de evaluación y se estudia la condición estática y dinámica de los indicadores. El análisis determina que tan relacionados están los indicadores entre sí y el peso inicial asociado a cada uno. El análisis dinámico visualiza como las relaciones afectan la evolución de la importancia de cada indicador al mediano y largo plazo

3.1 Estructura conceptual de evaluación

La Tabla 1 sistematiza la estructura conceptual de evaluación. En ella se pueden apreciar los indicadores que afectan a cada criterio, y los grupos de interés relacionados con cada indicador. También se presenta la etapa del ciclo de vida en la que participan los grupos de interés según el indicador afectado. Gracias a la misma tabla, se analiza el potencial de riesgo de los grupos de interés de acuerdo al No. de indicadores sociales que les afectarían. Para ello, se contabilizó la cantidad de veces que cada grupo es afectado por un indicador, en cualquier etapa del ciclo de vida. El resultado de este análisis se observa en la Figura 4.

Tabla 1. Estructura conceptual de evaluación

Criterio	Indicador	Etapa del ciclo de vida		
		Extracción	Producción de pellet	Producción de mezcla
Revalorización	ID1: Costo del aditivo por tonelada de mezcla		Investigador, Productor Ad., Productor MA	Investigador, Productor Ad., Productor MA
	ID2: Ampliación de la vida útil de un producto reutilizado	Reciclador, Investigador, Productor Ad, Regulador.	Investigador, Productor Ad., Regulador	
	ID3: Aporte técnico sobre los aditivos existentes			Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor, Regulador
	ID4: Puestos de trabajo nacional	Reciclador, Investigador, Productor Ad.	Investigador, Productor de Ad., Productor de MA	
Impacto en salud	ID5: Reducción de riesgo de incendio en vertedero	Reciclador, Investigador, Productor Ad., Regulador		
	ID6: Reducción del área de ocupación de suelo	Reciclador, Investigador, Productor Ad., Regulador		
	ID7: Cantidad de aditivo necesario	Reciclador, Investigador, Productor Ad., Regulador	Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor, Regulador	Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor
	ID8: Permanencia en botadero	Reciclador, Investigador, Productor Ad., Regulador		
Gasto social	ID1: Costo del aditivo por tonelada de mezcla		Investigador, Productor de Ad., Productor de MA	Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor
Impacto mediático y concientización pública	ID9: Grado de recepción por parte de los consumidores		Investigadores, Productor de Ad.	Productor MA, Consumidor
	ID10: Se enmarca dentro de la Ley REP y políticas públicas del Ministerio del Medio Ambiente	Reciclador, Investigador, Productor Ad., Regulador	Productor Ad., Regulador	
Innovación y desarrollo	ID11: Innovación y desarrollo patentado en la industria nacional	Reciclador, Investigador	Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor	
	ID12: Transferencia de conocimiento	Reciclador, Investigador	Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor	
Condiciones para el uso del producto	ID13: Interés de productores			Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor
	ID14: Certificaciones		Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor, Regulador	Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor, Regulador
	ID15: Oferta actual de fibra	Reciclador, Investigador, Productor Ad., Productor MA, Regulador	Investigador, Productor Ad., Productor MA, Consumidor, Regulador	
	ID16: Interés de consumidores			Investigador, Productor Ad., Productor MA
Políticas públicas del Ministerio del Medio Ambiente	ID10: Se enmarca dentro de la Ley REP y políticas públicas del Ministerio del Medio Ambiente	Reciclador, Investigador, Productor Ad., Regulador	Productor Ad., Regulador	

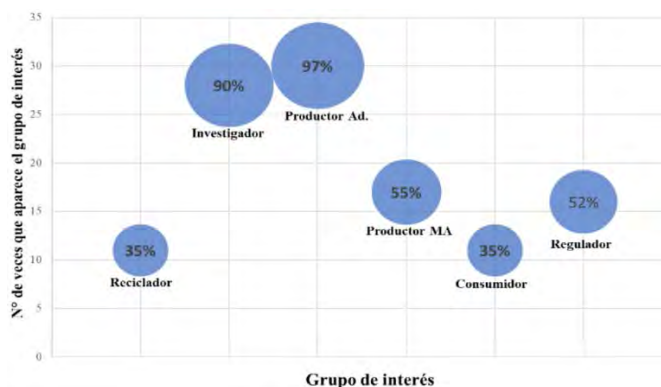


Figura 4. Gráfica de Potencial de riesgo por indicadores sociales

En la gráfica, el eje de las ordenadas corresponde al N° de veces que se repite el grupo de interés. El tamaño del círculo representa el porcentaje de indicadores que afecta a cada grupo de interés. En este caso se puede evidenciar que los Investigadores y Productores de Aditivo son quienes presentan un mayor riesgo de ser afectados por algún indicador social.

3.2 Modelo de evaluación: Interacción entre indicadores sociales y la contribución de las fibras de uso nacional a la sostenibilidad social

El resultado de la aplicación del SIB es la transformación de las múltiples respuestas lingüísticas en un único valor que represente la opinión de los especialistas. Gracias a esta transformación se obtiene la Matriz de relación entre indicadores expuesta en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de relación entre indicadores

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,416	0	0,074	0	0,428	0,170	0	0,536
2	0,244	0	0	0	0,626	0,606	0	0,464	0	0,430	0,386	0,270	0,312	0	0,248	0,432
3	0	0,290	0	0	0	0	0	0	0,518	0	0,490	0,506	0,458	0,560	0	0,508
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0,470	0	0,386	0	0,554	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0,410	0	0	0,338	0	0,670	0,178	0	0	0	0	0
7	0,490	0,398	0,282	0,226	0,442	0,536	0	0,572	0,208	0,450	0,336	0,166	0,348	0	0	0,366
8	0	0	0	0	0,366	0,376	0	0	0	0,600	0	0	0	0	0	0
9	0	0,210	0	0	0	0,220	0	0	0	0	0,254	0,250	0,552	0	0	0,552
10	0	0,344	0	0	0,388	0,224	0	0,156	0	0	0,240	0,224	0	0	0	0
11	0	0,376	0,524	0	0	0	0,258	0	0,142	0,294	0	0,428	0,304	0	0,214	0,302
12	0	0,262	0,450	0	0,166	0,166	0,272	0	0	0	0,570	0	0,246	0,310	0	0,080
13	0,316	0	0	0	0	0	0	0	0,458	0,308	0,290	0,194	0	0	0	0,446
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0,594	0	0,514	0,290	0,564	0	0	0,550
15	0,418	0	0	0,324	0	0	0	0	0,118	0,068	0	0	0,398	0	0	0,398
16	0	0,290	0	0	0,210	0,208	0	0,196	0,626	0	0,216	0,116	0,378	0	0,336	0

En base al modelo de evaluación del MCD se realizó un análisis estático y dinámico sobre los indicadores sociales que lo conforman, para establecer el comportamiento del modelo y los pesos de importancia de sus componentes.

3.2.1 Análisis estático

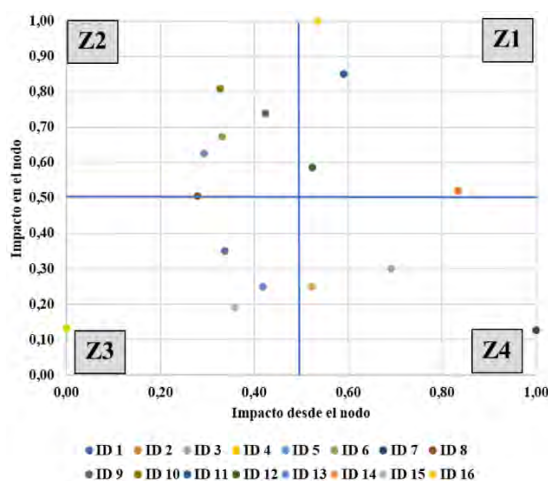
Aplicando la Ecuación (2) y Ecuación (3) respecto de la matriz de integración entre indicadores (Tabla 3) se obtienen los valores $In(Ci)$ y $Out(Ci)$. Estos valores fueron normalizados dividiéndolos entre el mayor valor del conjunto de indicadores. La Tabla 4 expone los valores $In(Ci)$ y $Out(Ci)$ obtenidos sin normalizar y normalizados.

Tabla 3. Normalización de $In(Ci)$ y $Out(Ci)$

ID	Indicador	Valores sin normalizar		Valores normalizados	
		$In(Ci)$	$Out(Ci)$	$In(Ci)$	$Out(Ci)$
1	Costo del aditivo por tonelada de mezcla	1,47	1,62	0,35	0,34
2	Ampliación de la vida útil de un producto reutilizado	2,17	4,02	0,52	0,83
3	Aporte técnico sobre los aditivos existentes	1,26	3,33	0,30	0,69
4	Puestos de trabajo nacional	0,55	0,00	0,13	0,00
5	Reducción de riesgo de incendio en vertedero	2,61	1,41	0,63	0,29
6	Reducción del área de ocupación de suelo	2,81	1,60	0,67	0,33
7	Cantidad de aditivo necesario	0,53	4,82	0,13	1,00
8	Permanencia en botadero	2,11	1,34	0,51	0,28
9	Grado de recepción por parte de los consumidores	3,08	2,04	0,74	0,42
10	Se enmarca dentro de las políticas públicas del MMA	3,37	1,58	0,81	0,33
11	Innovación y desarrollo patentado en la industria nacional	3,55	2,84	0,85	0,59
12	Transferencia de conocimiento	2,44	2,52	0,59	0,52

13	Interés de productores	3,99	2,01	0,96	0,42
14	Certificaciones	1,04	2,51	0,25	0,52
15	Oferta actual de fibra	0,80	1,72	0,19	0,36
16	Interés de consumidores	4,17	2,576	1	0,53

En la Tabla 3 $In(Ci)$ representa como el indicador Ci es afectado por los demás indicadores. $Out(Ci)$ representa como el indicador Ci afecta a otros indicadores. Finalmente, los resultados del análisis estático son plasmados en la gráfica presente en la Figura 5.



El eje vertical *Impacto en el nodo* corresponde a los valores $In(Ci)$. El eje horizontal *Impacto desde el nodo* corresponde a los valores $Out(Ci)$. La gráfica de la Figura 5 está dividida en cuatro zonas en las que se ubican los indicadores sociales. Los indicadores sociales son numerados en coherencia con el orden expuesto en la Tabla 3.

De esta forma, los indicadores sociales ubicados en la Zona 1 (Z1) tienen un alto grado de impacto en otros indicadores y desde otros. Por su parte, a los indicadores sociales ubicados en la Zona 2 (Z2) se les puede poner menor atención, ya que poseen un alto impacto desde otros indicadores, lo que indica que es muy difícil manejarlos porque implica intervenir varios indicadores a la vez.

En la Zona 3 (Z3) se ubican los indicadores que pueden mejorarse fácilmente, ya que poseen un bajo grado de impacto proveniente desde otros indicadores. Finalmente, en la Zona 4 (Z4) se ubican los indicadores más importantes y a los que se les debe prestar mayor atención. Estos indicadores son poco impactados por otros, haciendo más fácil intervenirlos. Sin embargo, poseen un alto grado de impacto en otros indicadores, lo que hace que intervenir estos indicadores mejora significativamente su desempeño de sostenibilidad social.

Según la zonificación establecida en el párrafo anterior, los indicadores de mayor relevancia corresponden a los que se ubican en la Zona 4. Estos indicadores corresponden a *Aporte técnico sobre aditivos existentes* (ID3), *Cantidad de aditivo necesario* (ID7) y *Certificaciones* (ID14).

3.2.2 Análisis dinámico

El MCD fue generado importando la matriz de valores iniciales expuesta en la Tabla 2 al software FCM Expert. El MCD muestra el modelo de evaluación con sus interrelaciones entre los indicadores sociales y los pesos de interrelación. El modelo de evaluación del MCD se presenta en la Figura 6.

Lo primero que se debe obtener son los valores iniciales con los que se realizará la simulación dinámica. Estos valores fueron definidos a través de la normalización de la Centralidad de los nodos mediante el análisis estático. Esta normalización consistió en dividir los valores $CEN(Ci)$ entre el mayor valor. Los valores iniciales normalizados se pueden visualizar en la Tabla 4.

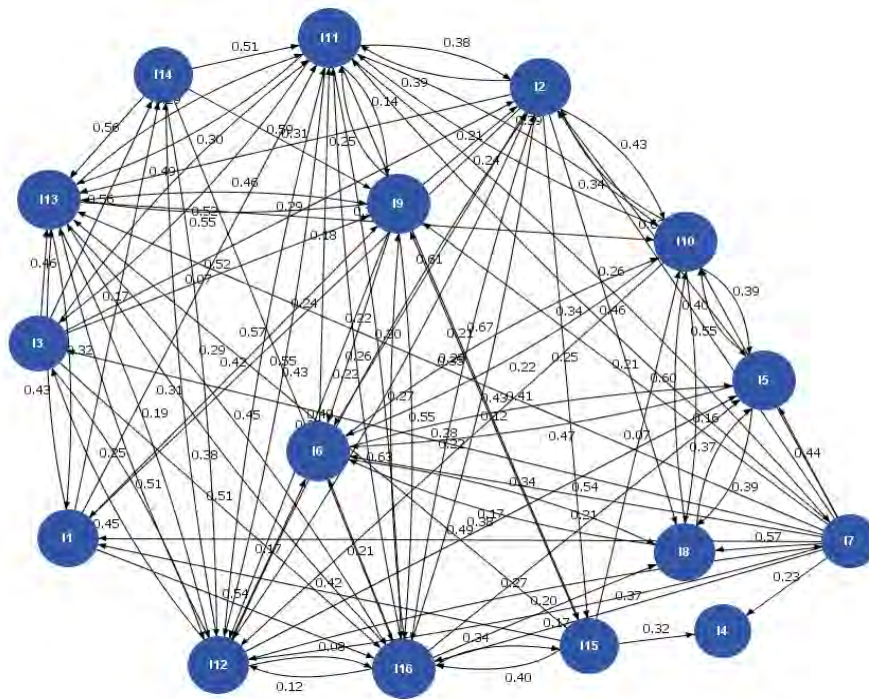


Figura 6. modelo de evaluación del MCD

Tabla 4. Valores iniciales normalizados

ID	CEN (CI)	Valor normalizado
1	3,092	0,46
2	6,188	0,92
3	4,586	0,68
4	0,55	0,08
5	4,018	0,60
6	4,402	0,65
7	5,35	0,79
8	3,454	0,51
9	5,118	0,76
10	4,95	0,73
11	6,39	0,95
12	4,966	0,74
13	6	0,89
14	3,552	0,53
15	2,522	0,37
16	6,746	1,00

Con los valores iniciales de la Tabla 4 se aplica la ecuación (4) y la ecuación (5), con una tasa de transición de $\lambda=0,75$. Los valores normalizados de una primera ronda son utilizados como valores iniciales para la siguiente iteración y así se prosigue análogicamente hasta encontrar la estabilidad de los indicadores. En la Figura 7 se presenta el análisis dinámico que muestra la evolución del peso de los indicadores sociales desde su situación actual al largo plazo.

El eje horizontal de la Figura 7 presenta los ciclos de iteración con tendencia a largo plazo y en el eje vertical se presentan los pesos iniciales de los indicadores. La situación actual de los indicadores corresponde a la iteración 0, la que representa la opinión de los especialistas. La escala temporal depende del contexto de aplicación, del proceso de innovación y la aceptación social. De esta forma es difícil anticipar un tiempo de evolución.

En la Figura 7 se puede observar que con el transcurso del tiempo el valor de importancia relativa asignado por los especialistas va variando a medida que se realizan las iteraciones. Algunos indicadores que no consideraban importantes a simple vista toman trascendencia; por ejemplo, el indicador *Costo del aditivo por tonelada de mezcla* (ID 1), *Puestos de trabajo nacional* (ID 4) u *Oferta actual de fibra* (ID 15).

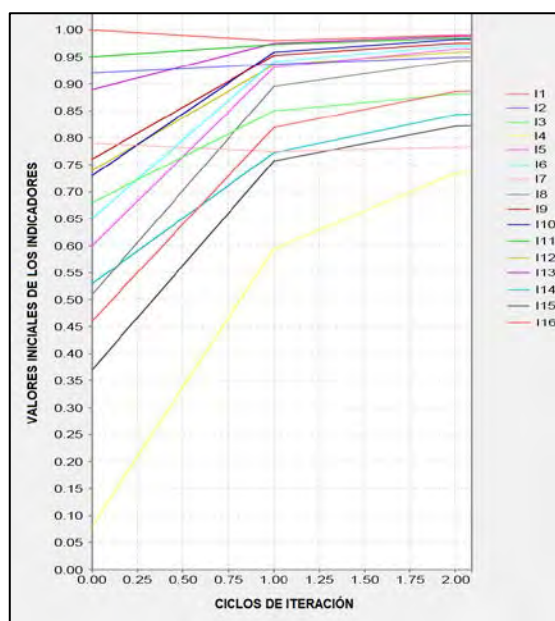


Figura 7. Gráfica de análisis dinámico

4. CONCLUSIONES

Para realizar esta investigación, se identificaron los criterios e indicadores diferenciadores que constituyen una estructura conceptual de la evaluación social de fibras en el ciclo de vida. Se realizó una revisión de la literatura, documentación y entrevistas con especialistas del área. Los criterios sociales identificados son: Revalorización, Impacto en la salud, Impacto mediático y concientización pública, Gasto social, Innovación y desarrollo, Condiciones para el uso del producto y Políticas públicas.

Por su parte, los indicadores sociales identificados son: costo del aditivo por tonelada de mezcla, ampliación de la vida útil de un producto reutilizado, aporte técnico sobre los aditivos existentes, puestos de trabajo nacional, reducción del riesgo de incendio, reducción del área de ocupación de suelo, cantidad de aditivo necesario, permanencia en botadero, grado de recepción por parte de los consumidores, políticas públicas del ministerio del medio ambiente, innovación y desarrollo patentado en la industria nacional, transferencia de conocimiento, interés de productores, certificaciones, oferta actual de fibra e Interés de consumidores.

Por otro lado, el indicador *Interés de consumidores* es el que presenta mayor relevancia en la actualidad, a corto y largo plazo. La razón de esto es que este indicador es altamente impactado por los demás. Sin embargo, cualquier intervención que busque una mejora para este indicador será muy difícil de lograr. De la misma manera, el indicador *Puestos de trabajo nacional* se mantiene como el menos relevante. Este indicador es impactado directamente solo por dos indicadores (Cantidad de fibra necesaria y Oferta actual de fibra). Mejorarlo es fácil, debido a que posee un bajo grado de impacto por otros indicadores. Sin embargo, esta mejora no implicaría mejoras significativas para la sostenibilidad social del producto, ya que no impacta a otros indicadores.

La utilidad práctica de esta investigación es obtener los indicadores sociales relacionados con el uso de las fibras en estudio para MAC y mezclas SMA. Adicionalmente, esta investigación aporta al conocimiento generando una metodología para la evaluación social de aditivos en base a fibra para mezclas asfálticas. Además, se obtienen las relaciones existentes entre los criterios sociales, indicadores sociales, grupos de interés y las etapas del ciclo de vida identificadas para el caso de estudio. En adición, esta metodología es aplicable en otros contextos como otros productos, proyectos, etc.

Los principales beneficiarios de este trabajo son los diferentes grupos de interés identificados (recicladores, investigadores, productores de aditivo, productores de mezcla, consumidores de mezcla y reguladores). Pues los resultados obtenidos en esta investigación proporcionan los indicadores sociales a los que se les debe prestar una mayor atención por quienes pueden tomar las decisiones para mejorar la sostenibilidad social de las fibras en evaluación, y mejorar la sostenibilidad social de las mezclas asfálticas en estudio.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al panel de especialistas multidisciplinarios entrevistados por su colaboración con el proyecto. Además, este estudio fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) del Gobierno de Chile a través del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt – INI) proyecto No. 11190501 y del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico FONDEF IDeA I+D Proyecto No. 2011016.

REFERENCIAS

- [1] Dirección de Vialidad. (2021). Red Vial Nacional: Dimensionamiento y Características. Dirección de Vialidad.
- [2] Valdés G. et al. (2020). Desarrollo de aditivo en base a Fibra Textil de Neumáticos Fuera de Uso (FTNFU) para mezclas asfálticas sustentables ambientalmente. Formulario Concurso IDeA I+D 2020.
- [3] ONU. (1987). Report of the world commission on environment and development: Our Common Future. New York.
- [4] ONU. (2002). Report of the world summit on sustainable development. Johannesburg.
- [5] Navarro I. et al. (2020). Role of the social dimension in the sustainability-oriented maintenance optimization of bridges in coastal environment. *The Built Environment* 196, 205-215.
- [6] Zarta P. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa* 28.
- [7] Hossain U. et al. (2018). Development of social sustainability assessment method and a comparative case study on assessing recycled construction materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 23(1), 1654-1674.
- [8] Martínez E. et al. (2015). Análisis de la sostenibilidad social en tipologías residenciales del gran Concepción (Chile). *Cuaderno Urbano* 19(19), 5-28.
- [9] López I. et al. (2018). The social dimension of sustainable development. *Revista Española de Socio.* 27(1), 25-41.
- [10] Lehmann A. et al. (2013). Social aspects for sustainability assessment of technologies—challenges for social life cycle assessment (SLCA). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18, 1581-1592.
- [11] Papageorgiou K. et al. (2020). Fuzzy Cognitive map-based sustainable socio-economic development planning for rural communities. *Sustainability* 12, 305.
- [12] Olazabal M. y Pascual U. (2016). Use of fuzzy cognitive maps to study urban resilience and transformation. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 18, 18-40.
- [13] Nasirzadeh F. et al. (2019). Modelling the social dimension of sustainable development using fuzzy cognitive maps. *International Journal of Construction Management*.
- [14] Bello R. et al. (2014). Análisis estático en mapas cognitivos difusos basado en una medida de centralidad compuesta. *Ciencias de la Información* 45(3), 31-36.
- [15] Aguilar J. (2005). A survey about Fuzzy Cognitive Maps Papers (Invited Paper). *International Journal of Computational Cognition* 3(2), 27-33.
- [16] Papageorgiou E. y Stylios C. (2008). Fuzzy Cognitive Maps. *Handbook of Granular Computing* 755-774.
- [17] Papakostas G. et al. (2012). Towards Hebbian learning of Fuzzy Cognitive Maps in pattern classification problems. *Expert Systems with Applications* 39, 10620-10629.
- [18] Stylios C. et al. (2008). Fuzzy cognitive map architectures for medical decision support systems. *Applied Soft Computing* 8, 1243-1251.
- [19] Lopez C. y Salmeron J. (2014). Dynamic risks modelling in ERP maintenance projects with FCM. *Information Sciences* 256, 25-45.
- [20] Papageorgiou E. y Salmeron J. (2014). Methods and Algorithms for Fuzzy Cognitive Map-based Modeling. *Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering* 1-28.
- [21] Maguiña R. (2010). Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio. *Revista de Investigación de Sistemas e Informática* 7(1), 91-104.
- [22] Rettenmaier J. y Söhne T. (2021). Recuperado: https://www.jrs-es.com/jrs_es/soluciones-de-fibras/bu-construccion-de-carreteras/
- [23] Valdés G. et al. (2020). Informe Hito 1: Formulación del aditivo granulado DE FTNFU. Informe de Hito.

Diseño de un dispositivo de utilidad para la verificación dimensional en soldaduras de filete y ranura

Jorge Wilfredo Vera Alvarado¹
Luis Fernando Caballero García²
Universidad Nacional de Trujillo
Perú

El aseguramiento de la calidad por inspección visual en componentes soldados requiere dispositivos que satisfagan las necesidades de verificar la sanidad y disconformidades dimensionales para posterior reparación. Como el alcance de un calibre es afectado por el factor de forma en las juntas soldadas a inspeccionar, se propone la invención de un dispositivo de utilidad para soldaduras de filete y ranura, a efecto de ser patentable. Para tener certeza sobre la mejora del dispositivo con fines comparativos, se planificaron inspecciones en probetas soldadas representativas con los calibres Cambridge Gauge, Fillet gauge, Hi-Lo Gauge, Adjustable Fillet Weld Gauge, Skew-T Fillet Gauge, Weld Size Gauge, V-WAC Gauge, por ser lo más parecidos a la invención. El dispositivo de utilidad por su diseño presentó ventaja para dimensionar de manera simultánea el tamaño de pierna y garganta en soldadura de filete. Al disponer de cuatro patas fue simple de maniobrar para verificar el tamaño de refuerzo en soldadura de ranura y dimensionar discontinuidades superficiales. El dispositivo propuesto mejora y ofrece ventaja técnica, cumple con los requisitos para ser patentable como modelo de utilidad en el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual, Perú.

¹ Magíster en Ciencia y Tecnología de materiales y Doctor en Ciencias ambientales.

Contacto: jvera@unitru.edu.pe

² Ingeniero Metalúrgico.

Contacto: cabgarcia96@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En la fabricación de componentes estructurales los materiales son trabajados y soldados para satisfacer las geometrías y requerimientos de diseño. Para el aseguramiento de la calidad para prevenir fallas o disconformidades se requiere realizar diversos ensayos, entre los cuales, la prueba visual es la de mayor utilidad, por ser simple, accesible y económico. Su importancia radica en la posibilidad de verificar la sanidad y requerimientos dimensionales en las juntas soldadas, los hallazgos se contrastan con criterios de calidad establecidos en normas aplicables con fines de aceptación, o rechazo para reparación. Se ha dicho que, la finalidad de la inspección visual es determinar si un conjunto soldado cumple con los criterios de aceptación de un código o norma especificaciones u otros documentos [1].

El examen visual por ser una herramienta muy valiosa para verificar la calidad de la soldadura, para la efectividad del ensayo, se requiere de un inspector capacitado y herramientas auxiliares de medición que cumplan con los requisitos del proyecto, y satisfagan las necesidades de la inspección [2]. La técnica más utilizada es la visual directa, donde el ojo humano es asistido por dispositivos de medición, fuentes de luz auxiliares, ayudas visuales y medios de grabación como fotografías y bocetos [3], se recomienda que el observador se ubique a menos de 610 mm con un ángulo de observación no menor a 30° [4].

Un programa riguroso de control de calidad incluye una secuencia de pruebas en todas las fases de construcción. La inspección puede ser antes, durante y después de la soldadura para revelar disconformidades de forma temprana en el proceso de construcción, reporte valioso para la calidad de la soldadura debido a que es posible reducir costos [2]. Una actividad previa a la secuencia de soldeo, consiste en la preparación de las juntas para soldeo, acorde a los requerimientos de diseño, por lo cual, se requiere examinar el acoplamiento y la alineación de las juntas. Las juntas por sus diversas geometrías se las clasifica en cinco categorías [5]. En la Figura 1 se aprecia la forma y denominación de las juntas.

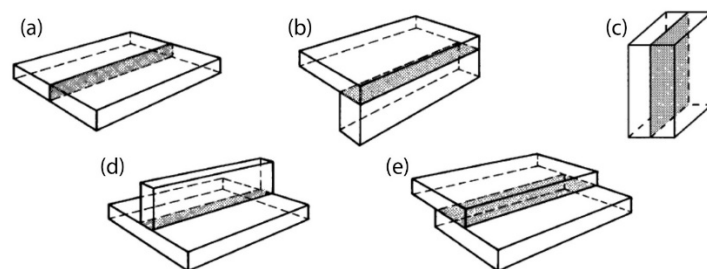


Figura 1. Juntas: (a) tope, (b) en esquina, (c) de borde, (d) en T, (e) de solape [5]

En la industria son más frecuentes las uniones por soldadura de filete y ranura, una soldadura de filete presenta una sección transversal aproximadamente triangular uniendo dos superficies aproximadamente en ángulos rectos en una junta en T o en L, por otro lado, una soldadura de ranura genera un canal entre los componentes a unir, puede ser realizadas desde un lado de la junta o desde ambos lados dependiendo de la accesibilidad, en general por su forma geométrica es su denominación [5]. En la Figura 2 se aprecia las formas y denominaciones características.

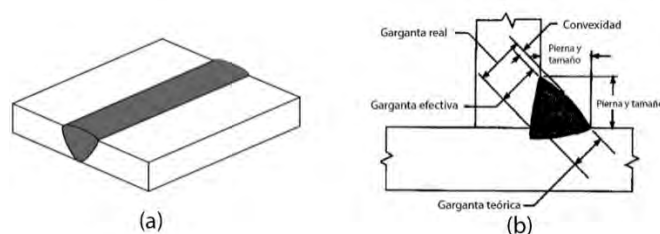


Figura 2. Soldadura de (a) ranura y (b) filete [5]

Después del soldeo, la inspección del conjunto soldado se orienta a evaluar la calidad de la superficie y comprobar si las dimensiones en la junta soldada están de acuerdo con el plano de diseño y normas de calidad, en general una norma se aplica a numerosos tipos de documentos, incluyendo códigos y especificaciones [6], incluso la práctica recomendada [7]. Las normas de calidad se establecen de acuerdo al tipo de servicio del componente en la industria, así tenemos para diseño y fabricación de edificios,

puentes y miembros tubulares [8], calderas y recipientes a presión [9], soldadura de tuberías e instalaciones relacionadas [10], todas ellas limitan la presencia de defectos en las juntas soldadas y disconformidades dimensionales. Se ha dicho que un defecto es una no conformidad de una discontinuidad, que por su naturaleza o efecto acumulado hace que una parte o el producto no cumpla con las normas o especificaciones [11].

El examen visual necesita herramientas de medición que satisfagan las necesidades de la inspección, para tal efecto en el mercado se dispone de diversos dispositivos, que en general presentan estructura compleja, funcionamiento engorroso y requieren capacitación detallada de inspectores, así tenemos los registros de patente del Calibrador Cambridge [12], Fillet Weld Galge [13], Skewed T-fillet Weld Gauge [14], Medidor de altura de metal de soldadura excesiva [15], Regla de inspección de soldadura [16] y Placa de escala de medición de soldadura de filete y pinza [17].

Por ser evidente que los factores de forma de las juntas soldadas afectan el alcance y efectividad de una herramienta para inspección visual, se planteó una estrategia orientada para la invención y patente de un dispositivo, como modelo de utilidad cuya disposición geométrica proporcione mejora tecnológica y ventaja técnica para verificación dimensional en soldadura de filete y ranura por el método de ensayo no destructivo de inspección visual.

En Perú, El Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual INDECOPI, promueve el desarrollo de una cultura-país de uso y registro de patentes [18]. La Organización Mundial de Propiedad Intelectual OMPI, es un ente internacional cuyo objetivo primordial es velar por la protección de los derechos de los creadores [19].

Cuando se refiere a patentes de modelo de utilidad, generalmente están dirigidos y limitados a mejoras sobre maquinarias o herramientas [20]. La figura jurídica de modelo de utilidad, se contempla en las leyes de más de 50 países, así como por acuerdos regionales [21].

2. MÉTODO

2.1 Objeto de estudio

En la Figura 3(a) se aprecia la disposición geométrica de la invención, que comprende un cuerpo base principal (1) el cual tiene dos ranuras longitudinales no pasantes, la primera ranura longitudinal no pasante (3) se ubica en el borde del lado izquierdo a una distancia X en sentido perpendicular medida desde la base del cuerpo base principal, la segunda ranura longitudinal no pasante (9) se ubica en el centro a una distancia $X/\sqrt{2}$ en sentido oblicuo a 45° medida desde el punto de intersección entre el inicio de la base y altura del cuerpo base principal, dispone de dos escalas impresas para medida (7, 13) ubicadas en la zona adyacente y paralelas a las ranuras longitudinales no pasantes a una distancia X para la primera y $X/\sqrt{2}$ para la segunda ranura, referenciadas desde la base de cada ranura.

Las dos ranuras longitudinales no pasantes tienen un orificio (5, 11) para el pase de un elemento de ajuste a un elemento móvil. El cuerpo base principal dispone de muescas rectangulares pasantes (14, 15, 16) que generan cuatro patas (17) ubicadas en el borde del lado derecho de alturas de $2/16''$, $3/16''$ y $4/16''$. Las cuatro patas (17) tienen igual ancho y sobre las cuales se establece la impresión de una escala de medida longitudinal, con intervalos mínimo de $1/32''$.

En la Figura 3(b) se aprecian dos elementos móviles (2, 8) que tienen una ranura longitudinal interna pasante, el primer elemento móvil (2) se ubica sobre la primera ranura longitudinal no pasante (3) y el segundo elemento móvil (8) se ubica sobre la segunda ranura longitudinal no pasantes (9) en el cuerpo base principal, disponen de la impresión de una línea de referencia (6, 12) ubicada a una distancia X para el primer elemento móvil y $X/\sqrt{2}$ para el segundo elemento móvil. Sus desplazamientos son manuales, el primero en sentido perpendicular y el segundo en sentido oblicuo a 45° respecto al eje horizontal. Los elementos de ajuste se ubican en los orificios establecidos en las ranuras longitudinales no pasantes para ensamble de los elementos móviles al cuerpo base principal.

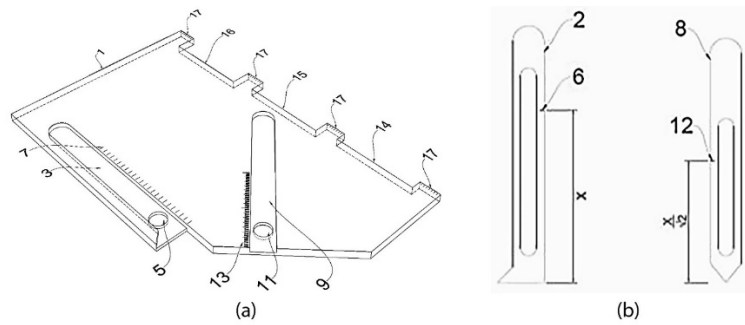


Figura 3. (a) Disposición geométrica del cuerpo base principal, y (b) elementos móviles del instrumento de utilidad

El presente modelo de utilidad pertenece al campo técnico de la inspección de uniones soldadas, más específicamente, la inspección visual en uniones soldadas aplicable a la verificación dimensional en soldadura de filete junta en T y soldadura de ranura junta a tope y exterior en esquina. Consta de un cuerpo base principal, dos elementos móviles y dos elementos de ajuste para ensamble y guía de desplazamiento. El cuerpo base principal tiene dos ranuras longitudinal no pasantes, dos escalas impresas para medida ubicadas en la zona adyacente a las ranuras y tres muescas rectangulares pasantes ubicadas en la base del cuerpo base principal que generan cuatro patas. En la Figura 4 se aprecia su disposición física.

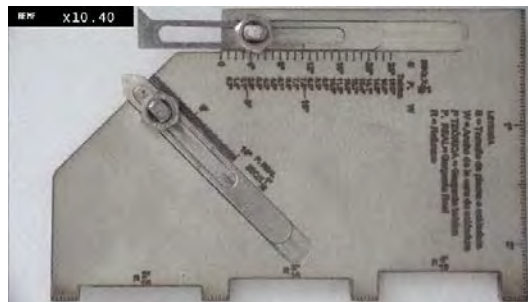


Figura 4. Disposición física del instrumento de utilidad

2.3 Procedimiento

Se identificaron los calibres más parecidos a la propuesta y se desarrollaron inspecciones en probetas soldadas en ranura y filete que contienen defectos típicos de soldadura, para determinar su alcance, y problema técnico que buscó resolver la invención; posteriormente se optimizó el diseño del instrumento y se replicaron inspecciones en la mismas probetas para demostrar la mejora tecnológica y ventaja técnica, con lo cual se cumplió con los requisitos para registro de patente del programa patenta [22]. En la Figura 5 se aprecia la disposición geométrica de cada calibre, y en la Figura 6 se aprecian las juntas soldadas representativas para las inspecciones.

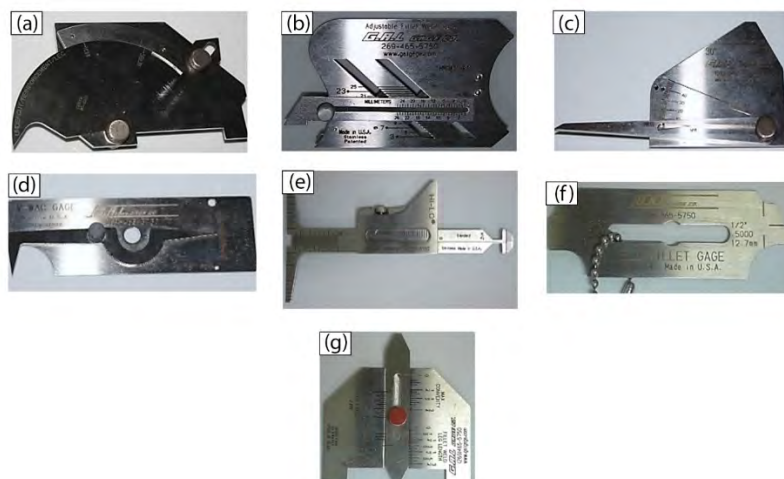


Figura 5. (a) Cambridge Gauge, (b) Adjustable Fillet Weld Gauge, (c) Weld Size Gauge, (d) Hi-Lo Gauge, (e) Skew - T Fillet Gauge, (f) Fillet Gauge, y (g) V - WAC Gauge

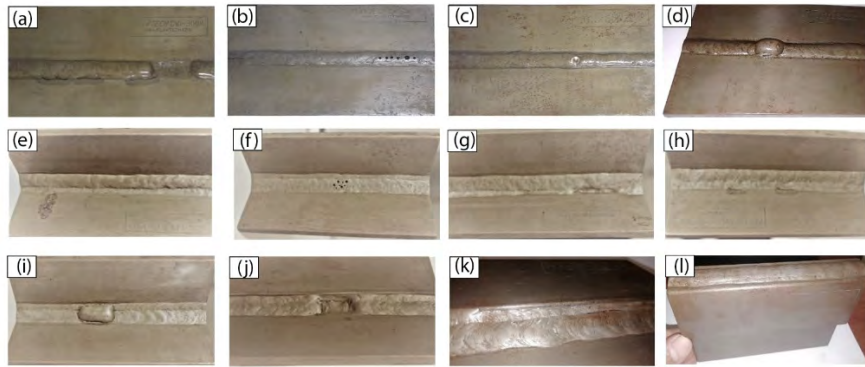


Figura 6. (a, b, c, d) soldadura de ranura junta a tope, (e, f, g, h, i) soldadura de filete junta en T, (j, k) soldadura de filete junta de solape, y (l) soldadura de ranura en junta de borde

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Alcance de los calibres para verificación dimensional

3.1.1 Cambridge Gauge

Fue posible verificar el ángulo de bisel y profundidad de socavado. En soldadura de filete juntas en T se determinó el tamaño de pierna y garganta, para tal efecto fue necesario rotar el calibre. No fue practico para juntas de solape al no disponer de un segundo punto de apoyo para el posicionamiento correcto del calibre. En soldadura de ranura presentó dificultad para la inspección del refuerzo con la punta pico de loro. En la Figura 7 se aprecia su disposición para la inspección en soldadura de filete y ranura.

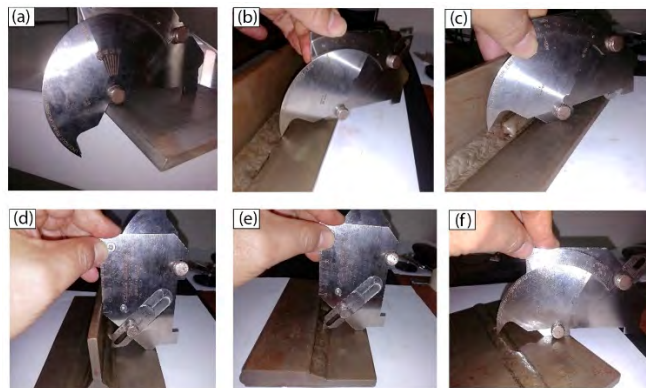


Figura 7. Disposición de Cambridge Gauge para verificar el tamaño de (a) ángulo de bisel, (b) socavado, (c) pierna en junta en T, (d) garganta en junta en T, (e) garganta en junta de solape, y (f) refuerzo en junta a tope

3.1.2 Fillet Gauge

Su utilidad estuvo limitada a juntas en T para soldaduras de filete de superficie cóncava y convexa, fue posible verificar ambos tamaños de pierna, para ello fue necesario rotar el calibre. En la Figura 8 se aprecia su disposición en la junta para la inspección en soldadura de filete.

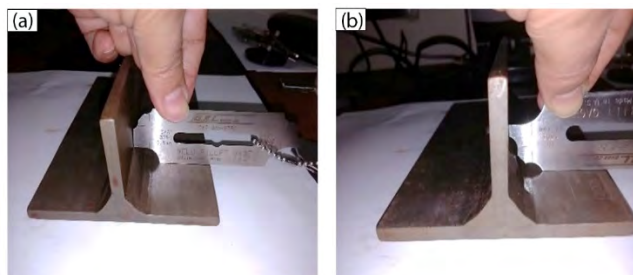


Figura 8. Disposición de Fillet Gauge en juntas en T para verificar el tamaño de pierna en (a) soldadura de filete de cara convexa y (b) soldadura en filete de cara cóncava

3.1.3 Hi-Lo Gauge

Fue posible verificar ambos tamaños de pierna en soldadura de filete juntas en T, para tal efecto fue necesario rotar el calibre. No fue practico para juntas de traslape. En soldadura de ranura fue posible verificar el tamaño del refuerzo. En la Figura 9 se aprecia su disposición en las juntas para la inspección en soldadura de filete y ranura.

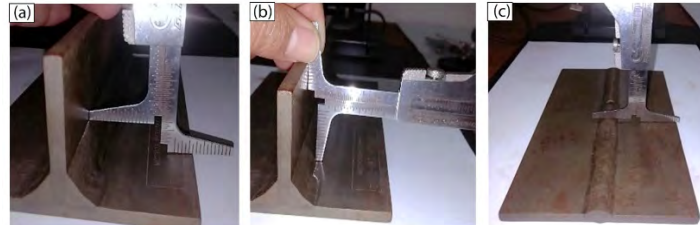


Figura 9. Disposición de Hi-Lo Gauge para dimensionar el tamaño de (a, b) ambas piernas en soldadura de filete y (c) refuerzo en junta a tope

3.1.4 Adjustable Fillet Weld Gauge

Permitió verificar el tamaño de pierna y garganta en soldadura de filete juntas en T, para tal efecto fue necesario rotar el calibre. No fue practico para juntas de solape, por no disponer de un segundo punto de apoyo para un posicionamiento estable. Cuando los tamaños de pierna fueron diferentes, no fue posible dimensionar la pierna de menor tamaño. En la Figura 10 se aprecia su disposición para la inspección en soldadura de filete.

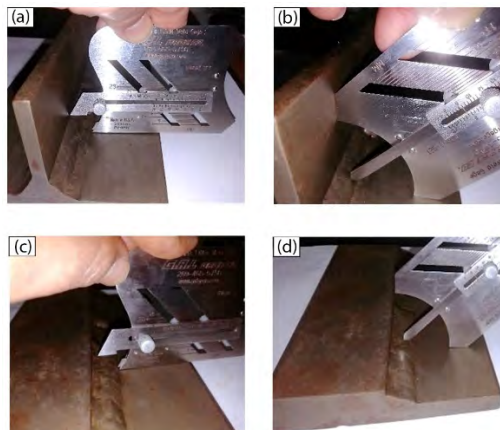


Figura 10. Disposición de Adjustable Fillet Weld Gauge para dimensionar el tamaño de (a) pierna en junta en T, (b) garganta en junta en T, (c) pierna en junta de solape y (d) garganta en junta de solape

3.1.5 Skew-T Fillet Gauge

Su utilidad estuvo limitada a juntas en T soldadura de filete, para verificar el tamaño de pierna y el ángulo entre ambos miembros estructurales, requirió áreas amplias para un posicionamiento estable. En la Figura 11 se aprecia su disposición en la junta para la inspección en soldadura de filete.

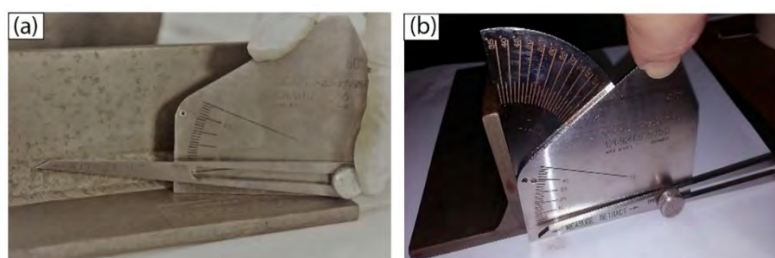


Figura 11. Disposición de Skew-T Fillet Gauge en juntas en T para dimensionar el tamaño de (a) pierna y (b) ángulo entre ambos miembros estructurales

3.1.6 Weld Size Gauge

Resultado muy práctico para verificar el refuerzo en soldadura de ranura. En soldadura de filete presento dificultad para sostener y desplazar el instrumento. En la Figura 12 se aprecia su disposición para la inspección en soldadura de filete y ranura.

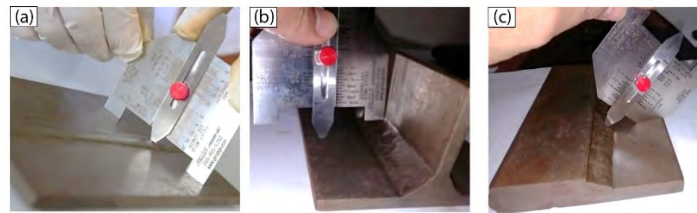


Figura 12. Disposición de Weld Size Gauge para dimensionar el tamaño de (a) refuerzo en junta a tope (b) pierna en junta en T y (c) garganta en junta de solape

3.1.7 V-WAC Gauge

Su utilidad estuvo limitada para verificar la profundidad de socavado. En soldadura de ranura presento dificultad para la inspección del refuerzo con la punta. En la Figura 13 se aprecia su disposición en la junta.

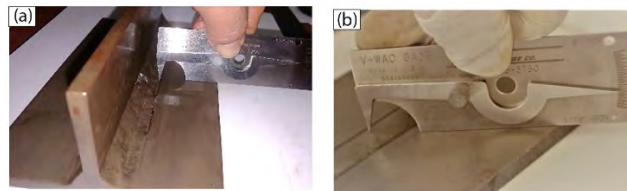


Figura 13. Disposición V-WAC Gauge para dimensionar el tamaño de (a) socavado y (b) refuerzo en junta a tope

3.1.8 Dispositivo de utilidad

Fue factible verificar el tamaño de pierna y garganta en soldadura de filete, juntas en T y solape de manera simultánea. En soldadura de ranura en juntas a tope, fue simple verificar el tamaño de refuerzo al disponer de cuatro patas en el cuerpo base principal. Resulto de utilidad para dimensionar discontinuidades superficiales. En la Figura 14 se aprecia su disposición para la inspección en soldadura de filete y ranura.



Figura 14. Disposición de dispositivo de utilidad para dimensionar el tamaño de: (a, b, c) pierna y garganta simultáneamente en junta en T, (d, e, f) garganta en junta de solape, (g, h, i) refuerzo en junta a tope, y (j, k, l) discontinuidades superficiales

Los resultados demuestran que la invención dispone de un diseño que proporciona mejora tecnológica, fácil de maniobrar por su pequeño tamaño, adecuado para áreas de soldadura estrechas, por su disposición geométrica y accesorios permiten verificaciones continuas en una sola etapa para la inspección en soldadura de filete para juntas en T y traslape y en soldadura de ranura juntas, estos hechos representan ventajas comparativas respecto a todos los calibres estudiados. En la Tabla 1 se detalla el alcance y limitaciones funcionales de cada calibre utilizado en el estudio.

Tabla 1. Alcance y limitación funcionales de los calibres

Tipo de calibre	Alcance	Limitación funcional
Cambridge Gauge	En soldadura de filete junta en T para verificar tamaño de pierna y garganta. En soldadura de ranura para verificar tamaño de refuerzo, profundidad de socavado desalineación y ángulo de bisel en la junta.	No aplica en soldadura de filete junta de solape. En junta en T requiere dos etapas para la inspección. Presenta dificultad para la inspección del refuerzo en soldadura de ranura.
Fillet Gauge	En soldadura de filete junta en T, para verificar ambos tamaños de pierna.	Específico para Filete juntas en T, requiere dos etapas para verificar ambos tamaños de pierna, no aplica para tamaño de garganta.
Hi-Lo Gauge	En soldadura de filete juntas en T, para verificar ambos tamaños de pierna. En soldadura de ranura para verificar el tamaño del refuerzo, desalineación y abertura de raíz en la junta, espesor de pared de tubo en juntas a tope	No aplica en soldadura de filete junta de solape. En juntas en T requiere dos etapas para la inspección. No es posible verificar el tamaño de garganta
Adjustable Fillet Weld Gauge	En soldadura de filete juntas en T, para verificar el tamaño de pierna y garganta.	Específico para Filete juntas en T para tamaño de piernas iguales y requiere al menos dos etapas para la inspección. No aplica en junta de traslape.
Skew-T Fillet Gauge	En soldadura de filete juntas en T, para verificar el tamaño de pierna y ángulo entre ambos miembros estructurales.	Específico para Filete juntas en T, requiere al menos dos etapas para verificar ambos tamaños de piernas.
Weld Size Gauge	En soldadura de ranura para verificar el tamaño de refuerzo	Específico para refuerzo en soldadura de ranura, En soldadura de filete presenta dificultad para sostener y desplazar el instrumento
V-WAC Gauge	En soldadura de filete y ranura para verificar la profundidad de socavado.	Específico para profundidad de socavado
Dispositivo de utilidad	En soldadura de filete juntas en T y solape para verificar tamaño de pierna y garganta en una sola etapa para la inspección. En soldadura de ranura para verificar tamaño de refuerzo	No aplica para ángulo de bisel, profundidad de socavado, desalineación, abertura de raíz en la junta, espesor de pared de tubo en juntas a tope y ángulo entre los miembros estructurales en juntas en T.

Las inspecciones también han permitido identificar desventajas comparativas, en cuanto no es posible verificar el ángulo de bisel (desventajas respecto a Cambridge Gauge), socavado (desventajas respecto a Cambridge Gauge y V-WAC Gauge), desalineación de la junta (desventajas respecto a Cambridge Gauge y Hi-Lo Gauge), abertura de raíz y espesor de pared de tubo en juntas a tope (desventaja a respecto al calibre Hi-Lo Gauge), el ángulo del miembro vertical en juntas en T (desventaja respecto a Skew-T Fillet Gauge).

Por el alcance y limitaciones comparativas de la invención fue conveniente realizar los procedimientos administrativos para registro de patente como modelo de utilidad en el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual INDECOPI, a través de su dirección de invenciones y nuevas tecnologías, que consta en: <http://servicio.indecopi.gob.pe/portalSAE/>

4. CONCLUSIONES

El dispositivo de utilidad dispone de un diseño que proporciona mejora tecnológica de fácil maniobrabilidad, por su disposición geométrica y accesorios presentan ventaja técnica al permitir una verificación continua del tamaño de pierna y garganta en una sola etapa para la inspección de juntas en T y solape. Al disponer de cuatro patas y ranuras métricas en el cuerpo base principal es simple verificar el refuerzo de soldadura de ranura y dimensionar discontinuidades superficiales.

Demostrada la ventaja técnica y mejora tecnológica, se acepta el registro de patente como modelo de utilidad en el INDECOPI.

El dispositivo presenta limitaciones funcionales, no es útil para verificar el ángulo de bisel, socavado, desalineación de la junta, abertura de raíz, espesor de pared de tubo en juntas a tope, el ángulo del miembro vertical en juntas en T, por lo cual se sugiere continuar innovando para ampliar el carácter funcional de un futuro calibre.

REFERENCIAS

- [1] American Welding Society. (2016). AWS QC1: Standard for AWS Certification of Welding Inspectors. American Welding Society.
- [2] American Welding Society. (2015). AWS B 1.11M/B1.11: Guide for the Visual Examination of Welds. American Welding Society.
- [3] Hellier, C. (2020). Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill.
- [4] American Society of Mechanical Engineers. (2019). ASME BPVC Section V Nondestructive Examination. American Society of Mechanical Engineers.
- [5] American Welding Society. (2020). AWS A2.4: Standar Symbols for welding, Brazing, and Nondestructive Examination. American Welding Society.
- [6] American Welding Society. (2008). Welding Inspection Technology. American Welding Society.
- [7] American Society for Nondestructive Testing. (2016). Recommended Practice No. SNT-TC-1A. American Society for Nondestructive Testing.
- [8] American Welding Society. (2020). AWS D1.1/D1.1M Structural Welding Code - Steel. American Welding Society.
- [9] American Society of Mechanical Engineers. (2013). ASME Section VIII Division 1: ASME Boiler and Pressure Vessel Code. American Society of Mechanical Engineers.
- [10] American Petroleum Institute. (2021). API Standar 1104: Welding of Pipelines and Related Facilities. American Petroleum Institute.
- [11] American Welding Society. (2010). AWS 3.0M/A3.0: Standard Welding Terms and Definitions. American Welding Society.
- [12] Lyncan G. (2009). Canedian Patente No. 2418927. Recuperado: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/024635572/publication/CA2418927C?q=CA2418927C>
- [13] Lyncan G. (1984). USA Patente No. 4485558. Recuperado: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/024071978/publication/US4485558A?q=US4485558A>
- [14] Brooks P. (1985). USA Patente No. 4,545,124. Recuperado: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/024096222/publication/US4545124A?q=US4545124A>
- [15] Ohara N. (1994). Japon Patente No. 6-241701. Recuperado: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DJPH06241701A>
- [16] Peng E. (2019). China Patente No. 208860222. Recuperado: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS6505410B1>
- [17] Bingsheng Y. (2020). China Patente No. 211783131. Recuperado: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DCN211783131U>
- [18] Villaran F. (2015). Historia de las patentes e invenciones en el Perú. Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual. Recuperado: <https://www.indecopi.gob.pe/documents/20791/203175/01.-Historiadelaspatentesweb.pdf/ee9da00e-ae8d-4fbf-a451-8b103dbc0d01>
- [19] Carrasquilla A. y Chacón A. (2019). Patente de invención, procedimientos para inscribir una patente en Costa Rica. Tecnología en Marcha 32(6), 43-54.
- [20] Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. (2007). Manual de la OMPI de redacción de solicitudes de patente. Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Recuperado: https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/es/patents/867/wipo_pub_867.pdf
- [21] Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. (2016). Principios básicos de la propiedad industrial. Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Recuperado: https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/es/wipo_pub_895_2016.pdf
- [22] Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual. (2019). Programa patenta. Universidades y Centros de Investigación. Recuperado: <https://www.patenta.pe/cai>

Estudio de las prestaciones y pérdidas de fricción de un motor de combustión interna alternativo usando un sistema de relación de compresión variable

Oscar Hernando Venegas Pereira¹

Luisa Fernanda Mónico Muñoz²

Duván Caballero Casallas³

^{1,3}*Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*

²*Fundación Universitaria Los Libertadores*
Colombia

En este estudio se analizan las prestaciones del motor MCE-5 VCRi con relación de compresión variable, en comparación con un motor convencional. Se parte de los principios del ciclo Otto para calcular la presión en los cilindros de combustión que, junto con estudios cinemáticos y conceptos fundamentales, permite el cálculo de la fricción en los sistemas pistón cilindro de cada motor. Se calculan las prestaciones de ambos motores a partir de criterios termodinámicos y la influencia de las pérdidas de energía debidas a fricción. Finalmente, se comparan las prestaciones que entregaría cada motor y se identifican los rangos de relación de compresión en que debería operarse el MCE-5 VCRi para brindar mayores prestaciones. El motor con relación de compresión variable muestra ventajas en prestaciones y fricción frente al convencional, con las mayores prestaciones al usar relaciones de compresión entre 9,1 y 14,1, y un aceptable rendimiento térmico e ingreso constante de calor al ciclo termodinámico. Cuando se mantiene constante la presión máxima en el cilindro, las mayores prestaciones están entre relación de compresión de 10,8 y 15, la máxima estudiada. Se encontraron beneficios al usar el sistema MCE-5 VCRi frente a uno convencional en términos de prestaciones y pérdidas de energía en el sistema pistón cilindro. Adicionalmente, se muestra el impacto de la relación de compresión usada en el MCE-5 VCRi y formas de sacar más provecho de esta tecnología.

¹ Ingeniero Mecánico, Magíster en Motores de Combustión Interna Alternativos y Doctor en Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte.

Contacto: oscar.venegas@escuelaing.edu.co

² Ingeniera Aeronáutica, Magíster en Motores de Combustión Interna Alternativos y Doctora en Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte.

Contacto: luisa.monico@escuelaing.edu.co

³ Ingeniero Mecánico.

Contacto: duvan.caballero@mail.escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Un estudio de emisiones contaminantes, realizado por la Organización Meteorológica Mundial OMM, indica que los niveles de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero aumentaron hasta niveles récord a nivel mundial [1-4]. En la Unión Europea UE, el transporte aporta más del 30% de las emisiones de CO₂, de las cuales, el 72% se debe al transporte terrestre, que emplea principalmente motores de combustión interna alternativos MCI [5].

Es la misma UE quien implementa reglamentación en emisiones aplicable a los MCI y buscará mayores reducciones con la normativa Euro 7 a partir de 2025 [6]. Para cumplir con estas normativas se puede apostar por autos eléctricos [7]; sin embargo, aunque estos tienden a contaminar menos que los de combustión durante su funcionamiento, el balance puede ser diferente cuando se tiene en cuenta la contaminación por generación de baterías con fuentes de energía provenientes del petróleo y carbón, que a 2019 suministraban el 60,1% de la energía consumida a nivel mundial, reduciendo así la viabilidad de los autos eléctricos en varios países [8-12].

Marcas como Mazda, Bosch, Hyundai, Toyota, entre otras, siguen innovando para reducir emisiones contaminantes en MCI. Así lo reflejan las tecnologías como MCI con relación de compresión variable VCR, pensados para aumentar la eficiencia de la combustión y para adaptarse de acuerdo con el rendimiento esperado del motor [13].

Los MCI con mecanismos de VCR son motores capaces de modificar la denominada relación de compresión, que es el cociente entre el volumen máximo del cilindro, estando el pistón en punto muerto inferior (PMI), y el volumen mínimo, con el pistón en punto muerto superior PMS [14-16]. La relación de compresión afecta el trabajo útil entregado por el MCI, afectando la eficiencia, la economía de combustible y las emisiones resultantes de la combustión [17,18].

Los MCI de VCR tienen presencia de manera conceptual, con diseños definidos y mejorados constantemente, impulsados por sus propios inventores y por diferentes empresas del sector automotor, en las que destacan Nissan, Toyota, Honda, Ford, Mercedes Benz, General Motors, Saab, Lotus, Peugeot y MCE5 [19-25].

Los MCI de VCR se pueden clasificar de acuerdo con las formas de variar la relación de compresión. Una clasificación propuesta por [13, 26, 27], como se ve en la Figura 1, parte de dos grandes grupos, uno donde se varía el volumen de la culata, y otro donde se varía la posición del PMS al que llegan los cilindros. Variar el volumen de la culata es algo complejo por el tamaño de esta, su peso, las condiciones de temperatura, presión y ahora fatiga a las que se enfrentan sus materiales. Por otra parte, es posible cambiar la posición del PMS según convenga, bien sea con un cigüeñal convencional o uno no convencional, teniendo en ambos casos una culata estática [26].

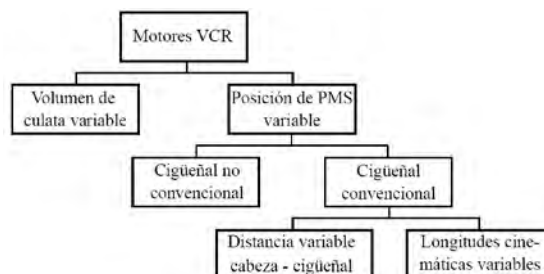


Figura 1. Clasificación Motores VCR

MCE5 cuenta con un modelo llamado MCE5 VCR-i, que además de cambiar la relación de compresión, mantiene un movimiento vertical del pistón de combustión, evitando esfuerzos laterales por la inclinación de la biela, presentes en MCI convencionales. El diseño del MCE5 VCR-i es mostrado en la Figura 2, donde los elementos adicionales a los encontrados en MCI convencionales son principalmente: un pistón auxiliar (1), cremalleras (2), un engranaje de transmisión (3), un rodillo de sincronización (4), y cilindros de presión.

El funcionamiento del MCE-5 VCRi parte del giro del engranaje de transmisión desde el extremo derecho, mediante el actuador hidráulico del pistón auxiliar, controlado electrónicamente; ese movimiento permite que la cremallera, conectada al extremo izquierdo del engranaje de transmisión, suba o baje con respecto a la culata. A su vez, la cabeza de pistón (5), cambia su posición y la del PMS por estar unida a la cremallera, generando así relaciones de compresión variables [28].

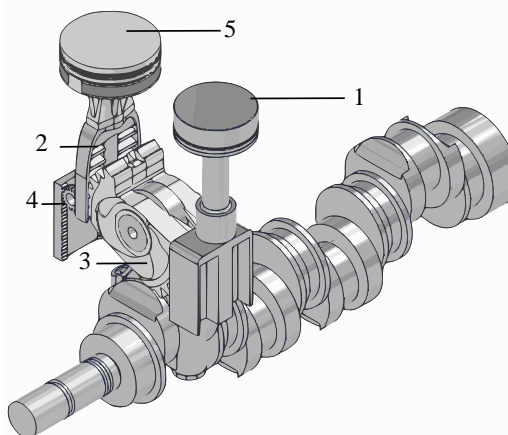


Figura 2. Partes de motor MCE-5 VCRi

Las más de dos décadas de desarrollo del MCE5 VCR-i, su prometedora próxima salida al mercado, y diseño particular, hacen de este, un motor digno de análisis y estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, surge la necesidad de generar un estudio detallado desde principios básicos de fricción en la zona donde más pérdidas suelen presentarse en los MCIA [25], justificado en conceptos fundamentales, y que puede evidenciar así, el impacto en la conservación de la energía, que genera el movimiento vertical del pistón de combustión del MCE5 VCR-i. Además, sirve como fuente de conocimiento del impacto en prestaciones que conlleva usar este MCIA como sustituto de uno convencional.

2. MÉTODO

Para el desarrollo de este trabajo se sigue la metodología presentada en la Figura 3.

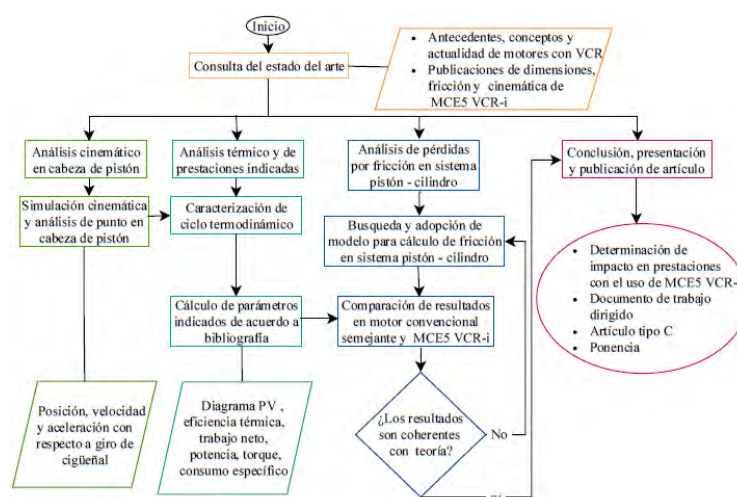


Figura 3. Esquema Metodológico

Se inicia con una fase de consulta del estado del arte, donde se indaga acerca de la actualidad automovilística en el mundo, las problemáticas a las que se enfrenta el sector automotor y las tecnologías existentes o en desarrollo para combatir dichas problemáticas, enfatizando en los motores de combustión interna alternativos MCI con relación de compresión variable VCR. Se realiza una búsqueda de motores VCR en el mercado y diseños de estos en patentes. Con suficiente información obtenida, se elige un MCIA con VCR como objeto de análisis en las fases posteriores de la metodología, recopilando primero artículos y publicaciones sobre fricción y cinemática de este motor.

La segunda fase consiste en el análisis cinemático del movimiento de la cabeza del pistón en el cilindro del motor estudiado, se consultan sus dimensiones en fuentes bibliográficas y se usan en la generación de un modelo CAD en Inventor. El modelo CAD, similar al motor original, es simulado cinemáticamente para analizar el comportamiento de la velocidad, posición y aceleración en un punto de la cabeza del pistón mientras el cigüeñal gira. Los resultados se interpretan y analizan posteriormente.

Como tercera fase se tiene el análisis térmico y de prestaciones, donde el análisis de posición de la cabeza del pistón obtenido en la fase 2, junto con teoría de ciclos termodinámicos sirven para la determinación del diagrama presión - volumen pV descrito por el motor a diferentes relaciones de compresión. Adicionalmente, se realiza un análisis teórico de combustión y de prestaciones indicadas tanto en el motor con VCR estudiado como en un motor convencional semejante para comparar los resultados.

En la cuarta fase, de análisis de pérdidas por fricción en el sistema pistón - cilindro, se estiman dichas pérdidas tanto para el MCE5 VCR-i como para su MCIA semejante con sistema biela manivela tradicional. Este estudio parte de diagramas de cuerpo libre y conceptos básicos de fricción, sin ahondar en temas tribológicos y mostrando el comportamiento general de la fricción en ambos MCIA. El estudio se complementa con la adaptación de estudios de otros autores para dar otro punto de vista y tener más herramientas de análisis.

Finalmente, como fase cinco se encuentra la presentación de las conclusiones del estudio. En esta fase se recopilan los resultados obtenidos en los estudios realizados anteriormente, se analizan y presentan como respuesta a los objetivos planteados inicialmente.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se desarrollaron estudios de cinemática, termodinámicos, de fricción y de prestaciones que permitan el análisis del motor de combustión interna alternativo (MCIA) y del motor MCE5 VCR-i, con relación de compresión variable.

3.1 Cinemática

Se describe el movimiento de las diferentes piezas conectadas, las cuales finalmente dan movilidad al sistema que permite variar la relación de compresión.

1. *Cigüeñal - Biela*: el cigüeñal, tiene un movimiento de rotación. El extremo inferior de la biela, conocido como cabeza de biela, gira acoplada a la manivela del cigüeñal, mientras que el extremo superior, o pie de biela, mantiene un movimiento vertical recíproco en una trayectoria alineada con el eje del cigüeñal. El movimiento del subsistema biela cigüeñal se comporta como el de los MCIA convencionales, así, a medida que el ángulo θ cambia, la componente vertical del punto a2 ($a2y$) cambia de acuerdo con la ecuación (1), mientras que el punto l1 se mueve en su línea vertical, con respecto al punto a1, pero ya no haciendo referencia a un punto el pistón principal sino a uno en el acople de la biela con el engranaje de transmisión en el MCE-5 VCRi, y su comportamiento se muestra en la Figura 4.

$$a2y = a \cdot \cos\theta \quad (1)$$

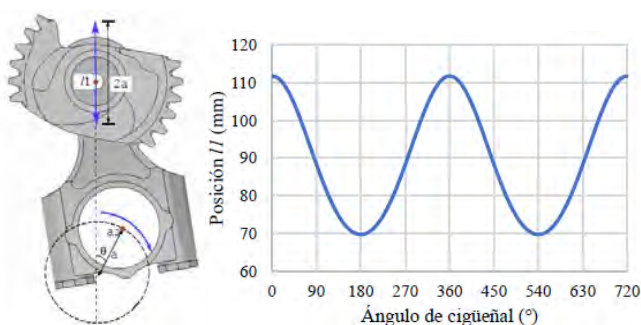


Figura 4. Movimiento cigüeñal-biela y Posición de pie de biela y centro de engranaje de transmisión en función del giro del cigüeñal

2. *Pistón auxiliar - engranaje de transmisión*: el engranaje de transmisión cuenta con un movimiento vertical por el acople al pie de la biela en su parte central, y un movimiento de rotación g , generado por el desplazamiento del pistón auxiliar en la parte derecha como se muestra en la Figura 5.

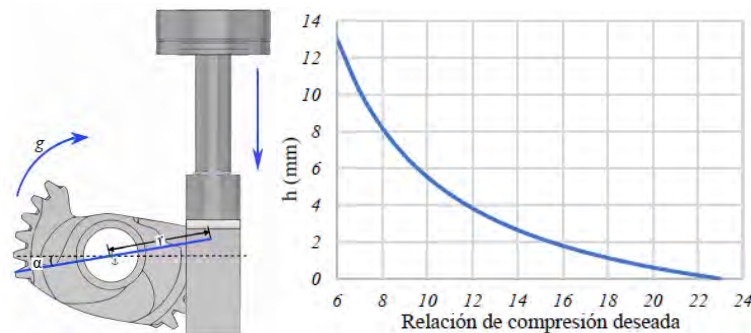


Figura 5. Movimiento engranaje - pistón auxiliar y Posición necesaria de pistón auxiliar, desde tope inferior, en función de la relación de compresión deseada

De acuerdo con las estrategias de cambio de relación de compresión, de MCE-5 VCRI, el valor de la relación de compresión base, definida así por separar modos de funcionamiento y características del motor determinadas por la relación de compresión, es 10 [1]. Se nombra el ángulo, visto en la Figura 5, como el comprendido entre una línea horizontal que pasa por el centro del engranaje, y la recta que va desde el centro del engranaje al punto de contacto con la cremallera. El ángulo es positivo para relaciones de compresión superiores a 10, y negativo para valores inferiores a 10, la relación de compresión base.

Para aumentar la relación de compresión, se tiene en cuenta la Figura 5, que representa el comportamiento de la posición necesaria del pistón auxiliar, para llegar a la relación de compresión deseada. La Figura 5 es obtenida, usando la relación de compresión mínima 6, que se da cuando el pistón auxiliar está en su tope mecánico más alto de 13mm y se puede conocer el volumen máximo en la cámara de combustión.

El valor de V_c comprende dos volúmenes diferentes, el volumen de combustión mínimo V_{cu} , presente entre la culata y la cabeza del pistón cuando este está en el PMS a la relación de compresión máxima, y el volumen cilíndrico generado al mover el pistón auxiliar para cambiar de r_c , que tiene como base el área del cilindro, y como altura el desplazamiento del pistón auxiliar h desde su tope mecánico más bajo. Sumando estos dos valores se obtiene la ecuación (2), que describe el volumen de la cámara de combustión para cualquier relación de compresión, pues tiene como variable al desplazamiento del pistón auxiliar (h).

$$V_c = V_{cu} + h \cdot A \quad (2)$$

Si bien V_c cambia con respecto a la posición del pistón auxiliar; V_{cu} tiene un valor constante, que puede determinarse evaluando el valor de V_c de 74, 31 cc obtenido para una r_c de 6.

3. *Engranaje de transmisión - pistón de combustión*: aunque la relación de compresión varíe, la carrera S del pistón principal se conserva en 84mm como se muestra en la Figura 6, donde a pesar de un desplazamiento en el pistón auxiliar, y, por ende, un movimiento rotacional g , se mantiene un desplazamiento S de la cabeza del pistón, entre PMS y PMI, pues ambos puntos se trasladan verticalmente una distancia de la magnitud de g .

La manivela del cigüeñal desplaza máximo dos veces su longitud al punto I1, de la misma manera que se calcula la carrera S para un MCI convencional, para un total de 42mm que también se desplaza el pistón principal por estar acoplado al engranaje de transmisión. Con este movimiento se ha realizado la mitad de carrera para el pistón principal del MCE-5 VCRI, faltando 42mm de desplazamiento que se generan con el movimiento rotacional del engranaje de transmisión.

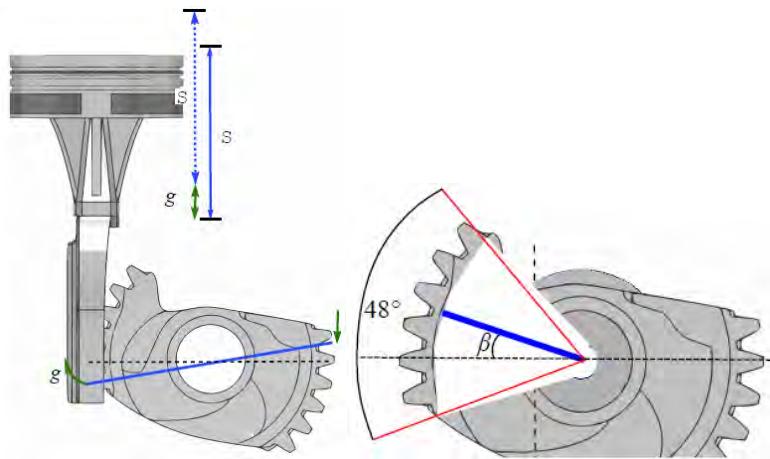


Figura 6. Movimiento engranaje de transmisión - pistón de combustión y Ángulo instantáneo β y apertura máxima del engranaje de transmisión

Con la teoría de cremalleras, si se divide la longitud lineal de 42mm entre el radio del engranaje, se obtiene que el engranaje recorre un ángulo de giro máximo de 48° en el paso del PMS a PMI, o viceversa, como se representa en la Figura 6. En esta misma figura se puede definir, que es el ángulo instantáneo comprendido entre la línea de contacto del engranaje de transmisión con el pistón principal, y una línea horizontal que pasa por el centro del engranaje. Conociendo β , y la posición de l_1 , se sabe la posición del pistón de combustión para cada ángulo del cigüeñal, que se obtiene en la ecuación (3) y se grafica en la Figura 7 evidenciando que para diferentes relaciones de compresión las curvas solo se desplazan, conservando la amplitud y comportamiento senoidal.

$$c = l_1 + r \cdot \beta \quad (3)$$

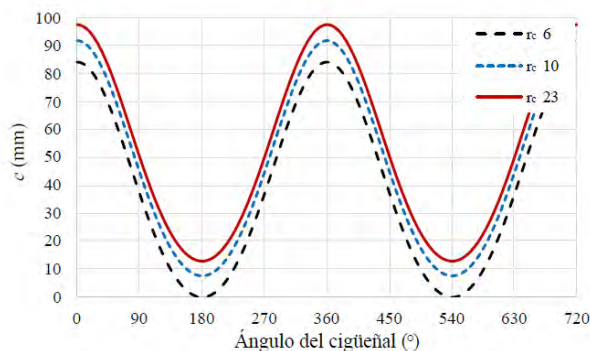


Figura 7. Posición de cabeza de pistón de combustión c en función del giro del cigüeñal

A partir de la posición del pistón de combustión para cada grado del cigüeñal obtenida anteriormente, y el régimen de giro del MCI, se puede conocer la velocidad media U_p e instantánea U_p de la cabeza de los pistones del MCE-5 VCRi. En un punto crítico, a la velocidad de giro de 6000rpm, el comportamiento de U_p se ve en la Figura 8, llegando a valores máximos de 27, 12m/s, calculados con la derivada de c con respecto al tiempo.

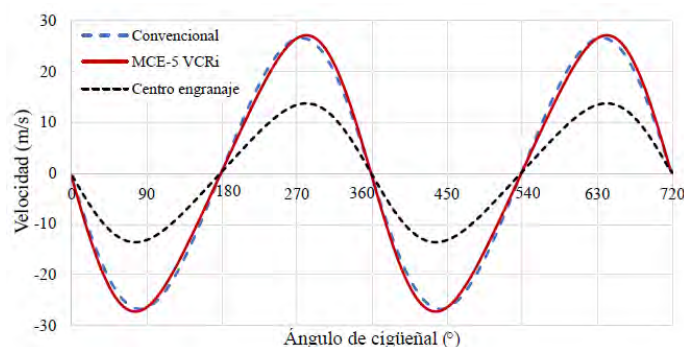


Figura 8. Velocidad de pistón de combustión en función del giro del cigüeñal a 6000 rpm

3.2 Ciclos termogasodinámicos

Con los datos geométricos del MCIa estudiado, y con parámetros propios de un ciclo Otto, como los mostrados en la Tabla 1, se generan los diagramas presión volumen p-V, donde el MCIa convencional opera a una relación de compresión de 10,8; seleccionada por ser el valor de la relación de compresión del motor original del Peugeot 407 1,8 16V 125 CV Confort 4P, familia del automóvil en que se probó el MCE-5 VCRI. El aumento en la relación de compresión permite presiones máximas más altas, sin necesidad de adicionar más combustible.

Tabla 1. Datos de entrada para análisis de ciclos termodinámicos [29-31]

Datos geométricos			
Diámetro pistón	D	75	mm
Carrera	s	84	mm
Número de cilindros	z	4	
Presión máxima soportada	P_{max}	130	bar
Datos termodinámicos			
Presión ingreso	P_{in}	1,013	bar
Temperatura ingreso	T_1	295	K
Presión escape	P_{esc}	1,013	bar
Relación de calores específicos	k	1,4	
Calor específico a v cte	C_v	1,5857	kJ/kgK
Poder calorífico combustible	Q_{HV}	45 310	kJ/kg
Relación aire combustible	AF	14,7	kgA/kgF
Eficiencia combustión	η_c	0,95	

Como punto de partida, se supone que durante todo el ciclo de conducción se quiere llegar a la presión máxima (130 bar), que puede soportar el motor manteniéndose estructuralmente seguro. En la Figura 9 se observa que la entrada de calor al ciclo, y por tanto de combustible se representa con la línea vertical al final de la compresión en cada ciclo, y su longitud es proporcional a la cantidad de calor agregado. Para llegar a la misma presión máxima, las relaciones de compresión altas requieren de menor consumo de combustible que las r_c bajas. Además, el área de los diagramas p-V se hacen cada vez más grandes a medida que se disminuye la relación de compresión, lo que representará mayor presión media indicada (pmi) y prestaciones.

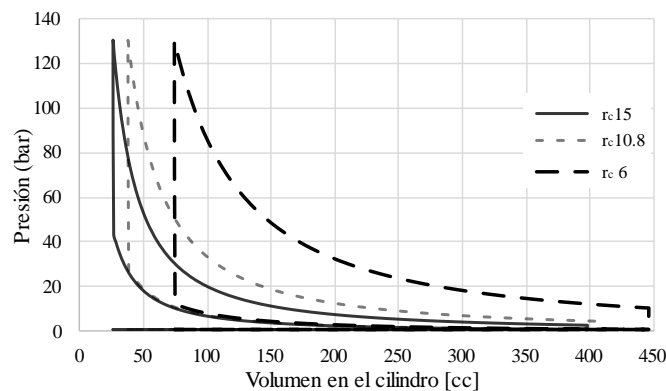


Figura 9. Ciclo Otto a presión máxima límite para MCIa MCE-5 VCRI

3.3 Fricción en sistema pistón-cilindro

En la Figura 10 se muestra el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en la cabeza del pistón de un motor convencional. La presión en la parte superior del pistón genera una fuerza sobre su área, que se transmite a la biela en la dirección del ángulo γ , comprendido entre una línea vertical que pasa por el centro del cigüeñal y la biela.

La biela, como elemento rígido, genera una reacción a la fuerza B , que actúa en sentido contrario a esta. La fuerza de reacción se puede descomponer en sus componentes escalares, teniendo ahora dos fuerzas, que actúan, una en dirección axial, la fuerza B_y , y una en dirección radial, la fuerza B_x .

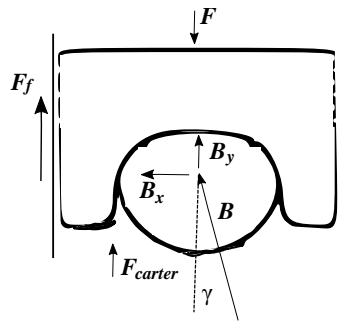


Figura 10. Diagrama de cuerpo libre en pistón convencional

La fuerza de fricción F_f es proporcional al coeficiente de fricción existente entre los elementos en contacto, y a la fuerza normal B_x , como se muestra en la ecuación (4). Se toma un coeficiente de fricción de 0,0225 [32], que es seleccionado por ser el valor crítico de lubricación mixta que tienen los elementos del pistón en el cilindro. La relación entre el ángulo γ y el ángulo θ se encuentra usando la ley de senos como se ve en la ecuación (5); pues, el ángulo θ es opuesto a la línea de la biela b , de la misma manera en que el ángulo γ lo es a la línea de la manivela a .

$$F_f = \mu \cdot B_x \quad (4)$$

$$\frac{\text{sen}(\theta)}{b} = \frac{\text{sen}(\gamma)}{a} \quad (5)$$

Con la presión en el cilindro multiplicada por el área del pistón, se obtiene la fuerza F , que ahora puede ser incluida en la sumatoria de fuerzas verticales de la ecuación (6). B_y es producto de la descomposición trigonométrica de la fuerza B . La masa m corresponde a la de la cabeza del pistón, y la aceleración a la derivada de la velocidad del pistón con respecto al tiempo. Si se despeja F_f de la ecuación (6), y se iguala a la Ecuación 4, es posible despejar la fuerza B en términos de γ como se muestra en la ecuación (7).

$$F - B_y - F_f = m \cdot a \quad (6)$$

$$B = \frac{F - m \cdot a}{\mu \cdot \text{sen}(\gamma) + \text{cos}(\gamma)} \quad (7)$$

Con el valor de B , su componente radial, y la ecuación (4), se realiza el cálculo de fricción F_f generada, en este caso, por la inclinación de la biela para cada ángulo del cigüeñal, pues se tiene en cuenta el ángulo γ y la fuerza B_x . Por otra parte, los anillos aportan fricción al sistema pistón - cilindro en análisis, y lo hacen bajo el mismo principio de la Ecuación 4. Se muestra en la Figura 11 el diagrama de cuerpo libre del anillo de combustión del pistón. En este caso, la presión del cilindro, presente en la holgura al interior del anillo y ranura del pistón, genera una fuerza lateral que actúa hacia la pared del cilindro, y se distribuye en la cara externa del anillo, que entra en contacto con el cilindro.

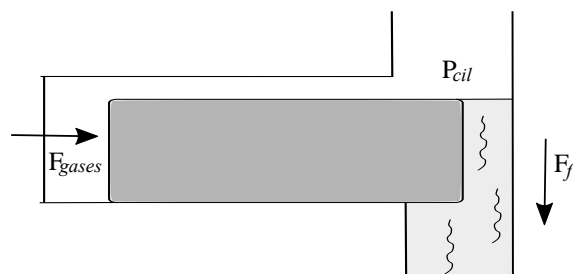


Figura 11. Diagrama de cuerpo libre de anillos del pistón

En el sentido radial del anillo de fuego, la fuerza F_{gases} se calcula multiplicando la presión que ejercen los gases, por el área de la superficie del anillo que entraría en contacto con el cilindro en ausencia de lubricante, como se ve en la Ecuación 8, presentada en términos de las componentes geométricas del anillo, como lo son su radio r_{ac} y su altura h_{ac} . La reacción de la pared del cilindro y el lubricante en contacto tiene la misma magnitud de la fuerza F_{gases} , por lo que puede sustituir a B_x en la ecuación (4) y poder así

determinar la fricción presente en el anillo de fuego en estudio (ecuación (8)). Para tener en cuenta la influencia del cambio de presión y de coeficiente de fricción en los anillos, se usa la proporcionalidad de pérdidas presentes en el anillo de fuego con respecto a las ocasionadas por el total de anillos del pistón (23%) [33].

$$F_{gases} = 2 \cdot \pi \cdot r_{ac} \cdot h_{ac} \cdot p \quad (8)$$

Los cálculos de fricción se pueden usar ahora para conocer su comportamiento a diferentes relaciones de compresión para el MCE5 VCR-i, tal como se ve en la Figura 12, donde se evidencia mayores pérdidas a medida que se incrementa la relación de compresión, principalmente porque la presión en el cilindro aumenta y hay más fuerza empujando los anillos hacia las paredes del cilindro. Es evidente que la fricción es proporcional a la relación de compresión y que las diferencias en fricción son más grandes justo después de la combustión, de tal forma que, si se realiza el cociente entre la fricción del MCE convencional, y la del VCR, se encuentra que el convencional tiene 14,5% más de fricción en el ángulo de cigüeñal de 370°.

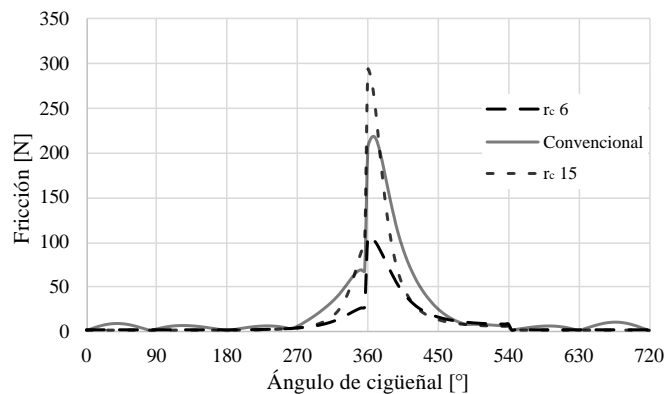


Figura 12. Fricción en MCE convencional y VCR a diferentes r_c a 4500 rpm

Para conocer la influencia de la fricción en el pistón en las prestaciones de los MCE en estudio, se llevan las pérdidas de presión a términos de presión media indicada de fricción (fpmi), llamadas en este caso así porque son teóricas. Para obtener la fpmi se aplica la integral de la ecuación (9), reemplazando la presión p , por la fricción en términos de pérdidas de presión p_f , para posteriormente dividir el resultado por el volumen desplazado por el pistón, de la ecuación (10). Para visualizar las pérdidas por fricción con respecto a lo recibido por el motor, en la Figura 13 se muestra la relación de fpmi/pmi, que indica el porcentaje de fpmi que se pierde en el cilindro gracias a la fricción con respecto a la pmi, factor clave y directamente relacionado con las prestaciones de los MCE.

$$W_i = \int p \cdot dV \quad (9)$$

$$p_{mi} = \frac{W_i}{V_d} \quad (10)$$

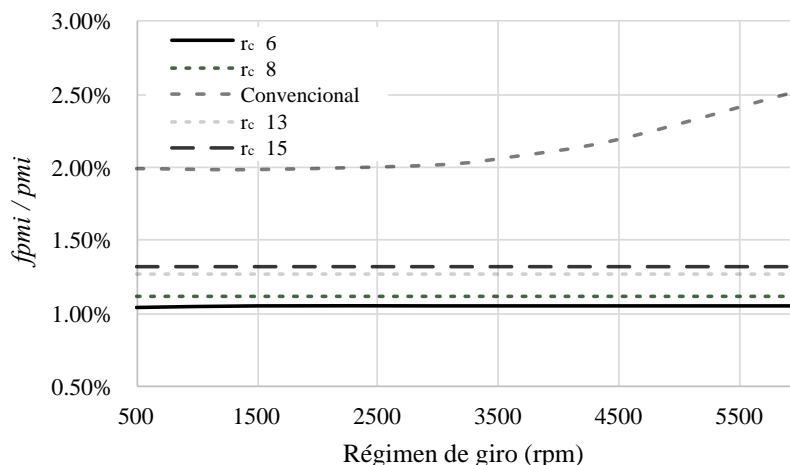


Figura 13. Relación entre fpmi y pmi a diferente régimen de giro y relaciones de compresión

Como se observa en la Figura 13, la relación f_{pmi}/p_{mi} no se ve afectada en el MCE-5 por el régimen de giro ni la relación de compresión, mientras que el motor convencional si muestra una tendencia de aumento de pérdidas relativas cuando aumenta el régimen de giro. Esto está alineado con la alta influencia de la presión en la fricción del MCIA VCR en estudio mencionada anteriormente. De la Figura 13 se puede inferir que el motor convencional genera más pérdidas con respecto a lo entregado, que las generadas por el VCR, para todo el régimen de giro estudiado, de acuerdo a lo estudiado en el sistema pistón cilindro; así, si se tiene como objetivo aumentar prestaciones sin aumentar en gran medida la fricción en el sistema estudiado, con respecto a las prestaciones obtenidas, es mejor usar el MCIA VCR sin importar la relación de compresión empleada, que usar el motor convencional.

Los porcentajes del eje vertical de la Figura 13 correspondientes a cada motor no superan el 2,6%, mostrándose una baja afectación de la fricción en las prestaciones teóricas bajo las condiciones dadas; no obstante, con cambios en la lubricación y coeficiente de fricción, puede verse un aumento de los porcentajes obtenidos, aunque manteniendo la tendencia de la Figura 13.

Si se divide el valor máximo de f_{pmi}/p_{mi} en el MCIA convencional, entre el calor mínimo de f_{pmi}/p_{mi} del VCR, encontrado a r_c de 6, se encuentra que el MCIA convencional tiene máximo 143% más pérdidas de fricción por p_{mi} entregada que el VCR, bajando hasta un valor 51,4% más veces cuando se trabaja a bajo régimen de giro y relación de compresión de 15 en el VCR. Estos valores muestran gran disminución de pérdidas con respecto a las prestaciones entregadas cuando se usa el motor VCR estudiado.

3.4 Prestaciones

En términos de prestaciones, se busca un rendimiento mecánico que tenga en cuenta exclusivamente las pérdidas de fricción para ver la influencia del mecanismo de transmisión del MCE-5 VCRi en las prestaciones del motor. El rendimiento mecánico por fricción en el sistema pistón cilindro η_{mf} , calculado a partir de la ecuación (11), muestra en la Figura 14, que se da un mayor rendimiento en el MCIA con VCR y mayor cambio con respecto al régimen de giro en el convencional, de 0,54% para el rango de velocidad trabajado.

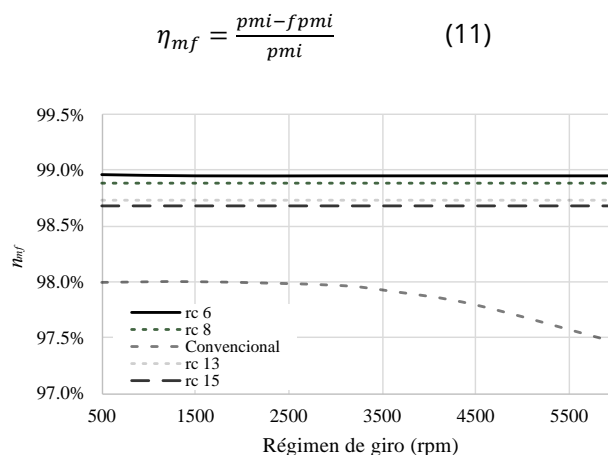


Figura 14. Rendimiento mecánico debido a fricción en sistema pistón cilindro

A partir de conceptos termodinámicos, y el rendimiento calculado anteriormente, en la Figura 15 se muestra la potencia efectiva teórica para los motores en función de la relación de compresión, manteniendo un ingreso de combustible constante. Se muestran altos aumentos de potencia con respecto al régimen de giro, y valores máximos a una relación de compresión de 12,64.

Para cada régimen de giro, se obtiene el promedio de la potencia brindada por el motor, encontrándose que las relaciones de compresión que se encuentran por encima de este valor son las de 9,1 a 14,1. Para conocer el régimen de giro al que comienza a ser significativo el resultado del cambio de r_c , se toma referencia el 30% de la amplitud máxima de las curvas de la Figura 15, encontrándose que solo las curvas descritas por regímenes de giro superiores a 1800 rpm tienen una amplitud superior a la de referencia, y por ende, una considerable influencia de la relación de compresión.

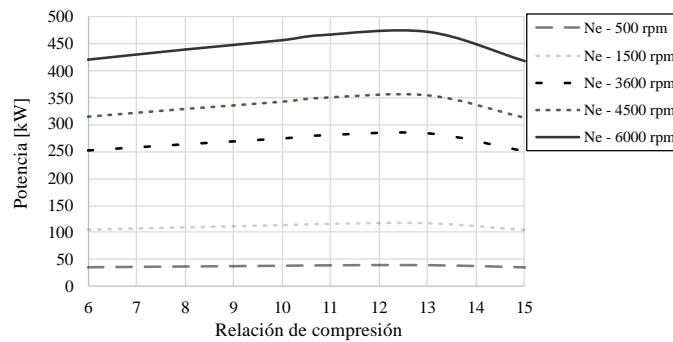


Figura 15. Potencia efectiva para diferentes regímenes de giro en función de la relación de compresión

El rendimiento térmico se calcula bajo la ecuación (12), y aunque aumente con la relación de compresión, tiende a presentar bajos cambios a altas relaciones de compresión. Para ver el valor que cambia el rendimiento térmico, en función de la relación de compresión, se muestra en la Figura 16, la derivada del rendimiento térmico con respecto a la relación de compresión $d\eta_t$. Como puede verse, a mayor relación de compresión, menor es el cambio presentado en la eficiencia térmica, lo que lleva a buscar el valor de r_c crítico en que esto ocurre. Bajo el criterio de considerar relevantes los cambios superiores al 30% del valor máximo de $d\eta_t$, se multiplica 30% por el valor máximo de $d\eta_t$ en el rango de relación de compresión usado en el MCE-5 VCRI, que es r_c 6. El valor de referencia obtenido (0,00977) se representa con una línea horizontal en la Figura 16, separando los cambios considerables de rendimiento térmico de los más pequeños.

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_c^{k-1}} \quad (12)$$

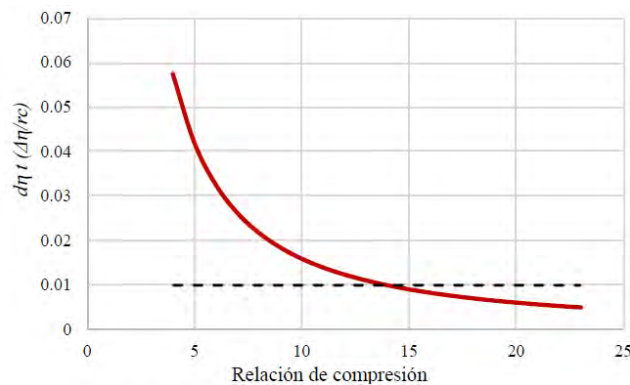


Figura 16. Derivada de rendimiento térmico con respecto a la relación de compresión. La línea punteada representa el valor de referencia

Igualando las dos curvas de la Figura 16, se obtiene la relación de compresión crítica a la que debería analizarse con mayor detalle si vale la pena aumentar la relación de compresión, pues ya no se obtienen tantos beneficios por cada unidad de r_c aumentada como antes del valor de r_c crítico, que es 14,18 en este caso. Este valor resulta bastante conservador con respecto a las r_c encontradas en motores diesel del mercado; no obstante, debe tenerse en cuenta que se escogió un valor de referencia del 30% del valor máximo de $d\eta_t$ para este análisis, para ser congruente con el valor de referencia escogido para analizar la potencia anteriormente, aunque puede ser inferior de acuerdo con los objetivos de estudio, y obtener r_c críticas más altas.

Por otra parte, al comparar el valor obtenido, se encuentra que está cercano a la r_c máxima a la que opera el MCI VCR en estudio con gasolina, el combustible usado para el cálculo. También es posible comparar la r_c crítica con la usada por MCI MEP actuales, cercana a 11, mostrándose por encima de lo convencional y con mayor rendimiento que estos.

Interpretando los resultados de rendimiento y prestaciones obtenidos, de manera conjunta, se encuentran 3 zonas de funcionamiento que pueden dar mayor claridad de cómo aprovechar un MCI VCR bajo las condiciones del estudio presente, mencionadas a lo largo del documento y destacadas por el consumo

constante de combustible. La primera zona se encuentra desde r_c 6 a 9,1, caracterizada por brindar prestaciones por debajo de la media y contar con un rendimiento térmico que aumenta con velocidad, pero sigue siendo bajo con respecto al encontrado en la segunda zona. La zona dos inicia en una r_c de 9,1 y finaliza en r_c de 14,1, marcada por los valores en que se supera la media de prestaciones de la Figura 15, coincidiendo 14,1 con la r_c que limita el rango de relaciones de compresión con alta respuesta favorable a los aumentos de r_c en términos de η .

Por último, la zona 3 se caracteriza por ser la más afectada por la fricción en el sistema pistón cilindro, bajando las prestaciones al nivel de las de la zona 1, pero siendo la de mayor rendimiento térmico de las 3, aunque este valor varíe poco a lo largo de sus límites, marcados por una r_c de 14,1 y de 15. El valor máximo de la zona 3 se escoge porque de acuerdo a la Figura 15, es el valor en que las prestaciones comienzan a bajar con respecto a las de la zona 1, pudiéndose extrapolar la tendencia de su curva, y de la del rendimiento térmico a una zona 4, en donde las pérdidas hacen que las prestaciones sean bajas, aunque se cuente con rendimientos térmicos altos y estables por su comportamiento de bajo cambio.

Las zonas encontradas bajo la misma entrada de combustible difieren de lo encontrado en la sección de ciclos termodinámicos al analizar una entrada variable de combustible, con el fin de garantizar la presión máxima en el interior del cilindro, aunque se cambie de relación de compresión. Teniendo ahora un panorama de prestaciones efectivas, se puede analizar lo encontrado bajo estas condiciones. En primera medida se asume que el fenómeno de autoencendido de la mezcla inicia a la presión de fin de compresión de la relación de compresión convencional, algo coherente con los criterios de selección de relaciones de compresión máximas de acuerdo con las características del combustible y su octanaje en MCI A.

La primera zona, en este caso, inicia en la relación de compresión mínima estudiada, 6, y termina en la relación de compresión crítica de inicio de knocking, que es 10,8. Esta zona se caracteriza por mostrar gran área en la curva p-V de la Figura 9 para las relaciones de compresión bajas, indicando mayores prestaciones esperadas en el motor que en las r_c altas, que cuentan con menor área en su interior.

A diferencia del análisis a entrada de calor constante, el rendimiento térmico es inverso a la relación de compresión para mantener una presión máxima constante, ya que en términos termodinámicos depende del ingreso de combustible al ciclo, y la cantidad de este último es inversamente proporcional a la relación de compresión, como se ve en las líneas verticales de la Figura 9, así que se esperan altas prestaciones y bajo rendimiento térmico.

4. CONCLUSIONES

Se encontró una reducción de pérdidas de fricción en el sistema pistón cilindro, al usar un MCI A con mecanismo de compresión variable de MCE5 VCR-i en lugar de uno semejante con sistema convencional; pues el segundo presenta desde 1,51 hasta 2,43 veces la fricción del primero en el régimen de giro estudiado, cuando ambas pérdidas están divididas por la pmi que producen en su ciclo termodinámico. En términos de fricción pura, el MCI A convencional produce hasta 14,5% más fricción que el VCR a la misma r_c en grados cercanos al del inicio de la combustión, dejando en evidencia las ventajas del movimiento vertical de su pistón.

Para el estudio de ingreso de calor constante se obtuvieron 3 zonas de funcionamiento principales. De una r_c de 6 a 9,1 se encuentra bajo rendimiento térmico, aunque con rápido incremento, mientras que las prestaciones están por debajo de la media. De r_c 9,1 a 14,1 están las prestaciones más altas, con un rendimiento térmico medio y poco variable. Finalmente, de r_c 14,1 a 15, se encuentran los rendimientos térmicos más altos y casi constantes, con prestaciones nuevamente por debajo de la media debido a la influencia de la fricción calculada.

En el caso de estudio a presión máxima en el cilindro constante, se estiman altas prestaciones y consumo de combustible, aunque bajo rendimiento de r_c 6 a 10,8; mientras que de r_c 10,8 a 15 los valores se invierten, estando ahora con bajas prestaciones y consumo de combustible, para lograr un alto rendimiento térmico.

REFERENCIAS

- [1] Siegmund P. et al. (2019). The Global Climate in 2015-2019. WMO.
- [2] Andrew R. et al. (2019). Statement on the State of the Global Climate in 2019. WMO
- [3] WMO. (2020). Global-Atmosphere-Watch y World-Meteorological-Organization. WMO Greenhouse Gasbulletin The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on GlobalObservations through. World Meteorological Organization.
- [4] Friedlingstein P. et al. (2019). Global Carbon Budget 2019. Earth System Science Data 11, 1783–838.
- [5] Bruyninckx H. (2016). Hacia una movilidad limpia e inteligente transporte y medio ambiente en Europa. Agencia Europea Del Medio Ambiente.
- [6] UE. (2017). Reglamento (UE) 2017/1154 de la comisión de 7 de junio de 2017. Unión Europea.
- [7] Falivenen L. y Koop F. (2018). Informe COP24 Katowice. Press.
- [8] González V. (2019). Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España. Madrid.
- [9] Coz A. et al. (2018). Contaminación derivada del consumo de un coche eléctrico en el mix energético español. Universidad de Cantabria.
- [10] Robles C. y Rodríguez O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. Espacios.
- [11] Whiteman A. et al. (2020). Renewable capacity statistics. Press.
- [12] Ferrari L. (2013). Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas. Revista Mexicana de Física 59, 36–43.
- [13] Milojevic S. y Pesic R. (2018). Determination of combustion process model parameters in diesel engine with variable compression ratio. Journal of Combustion 18, 5292837.
- [14] Morales M. et al. (2014). Caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustible. Instituto Mexicano del Transporte.
- [15] MCE-5VCRi. (2015). What is VCRi? Pushing Back the Fuel Consumption Reduction Limits. Press.
- [16] Akihisa D. y Daisaku S. (2010). Research on improving thermal efficiency through variable super-high expansion ratio cycle. Press.
- [17] Beltrán J. (2020). Análisis del uso de diferentes tipos de gasolinas y aditivos en la vida útil de algunos elementos de un motor de combustión interna. Investigación Tecnológica 2, 9.
- [18] Pesic R. et al. (2010). Benefits and challenges of variable compression ratio at diesel engines. Thermal Science 14, 1063–1073.
- [19] Mishra R. et al. (2016). VC-T Engine An Advancement in 4-Stroke Engine. Blue Eyes Intelillence Engineering.
- [20] Esaki. (2016). Biela de longitud variable y motor de combustión interna con relación de compresión variable. Press.
- [21] Yamada D. y Yoshikazu T. (2007). Un motor de relación de compresión variable. ES2267007.
- [22] Clarke J. y Tabaczynski R. (2000). Internal combustion engine with adjustable compression ratio and knock control. Press.
- [23] Rey J. (2014). Estado del arte y perspectivas de futuro de la movilidad personal urbana. Universidad Carlos III de Madrid.
- [24] Schwartz D. (2018). Motor de compresión variable de SAAB: demasiado extraño para vivir, demasiado raro para morir. Press.
- [25] Ershov M. et al. (2021). Hybrid low-carbon high-octane oxygenated gasoline based on low-octane hydrocarbon fractions. Science of The Total Environment 756, 142715.
- [26] Salazar L. (2018). Diseño de sistema de relación de compresión variable, para un motor de combustión interna monocilíndrico de investigación similar al CFR. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [27] Gaitán H. y Valbuena C. (2019). Diseño conceptual del sistema que permite variar la relación de compresión en un motor de combustión interna. Press.
- [28] MCE-5VCRi. (2019). Repousser Les Limites de La Réduction de Consommation de Carburant. Actionneur VCR.
- [29] MCE-5. (2013). Combustión pistón. Press.
- [30] Payri F. y María D. (2011). Motores de combustión interna alternativos. Universitat Politècnica de València.
- [31] Çengel Y. y Boles M. (2011). Termodinámica. McGraw-Hill.
- [32] Stanley R. et al. (1999). A simplified friction model of the piston ring assembly. Press.
- [33] Montoya V. (2008). Contribución al estudio experimental de la fricción pistón-camisa en un motor de combustión interna. Universidad Politécnica de Madrid.

Capacidad de detección de defectos en juntas soldadas al variar la técnica de ensayo con partículas magnéticas

Jorge Wilfredo Vera Alvarado¹
Luis Fernando Caballero García²
Martín Taboada Neira³
Universidad Nacional de Trujillo
Perú

El ensayo de partículas magnéticas es un método utilizado para revelar defectos superficiales en componentes soldados y asegurar su calidad bajo criterios estipulados en normas. Debido a que los defectos por presentar diversas formas y tamaños generan incertidumbre para ser detectados, se propone evaluar la capacidad de detección de defectos relevantes en juntas soldadas al variar la técnica de ensayo por el método de partículas magnéticas. Se planificaron inspecciones con yugo para magnetización indirecta, aplicando las técnicas de ensayo de partículas magnéticas visibles y fluorescentes sobre juntas soldadas de acero, que contenían defectos superficiales previamente caracterizados. La capacidad de detección de defectos relevantes fue evaluada por efecto de comparar, para cada técnica de ensayo, los valores a_{50} , a_{90} y $a_{90/95}$ obtenidas con el mh1823POD mediante el método estadístico POD \hat{a} vs a . Los resultados mostraron que las técnicas con partículas magnéticas visibles y fluorescentes presentan rendimiento similar, por lo cual son adecuadas para inspecciones de juntas soldadas. Sin embargo, las indicaciones formadas con partículas magnéticas húmedas fluorescentes son más precisas y cercanas al tamaño real del defecto.

¹ Magíster en Ciencia y Tecnología de materiales y Doctor en Ciencias ambientales.

Contacto: jvera@unitru.edu.pe

² Ingeniero Metalúrgico.

Contacto: lcaballerog@unitru.pe

³ Ingeniero Metalúrgico y Doctor en Ciencias ambientales.

Contacto: mtaboada@unitru.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos no destructivos END son un conjunto de métodos utilizados en la industria para detectar defectos en materiales y estructuras, ya sea durante la fabricación o mientras están en servicio, y así garantizar su confiabilidad y seguridad. En las diferentes ramas de la industria, el ensayo de partículas magnéticas es uno de los métodos de END que está usualmente incorporado en los códigos y especificaciones de fabricación como requisito en el control de calidad de las uniones soldadas, verificando que cumplan los criterios exigidos por estas normas [1-6].

El método de ensayo de partículas magnéticas consiste en inducir una fuerza magnetizante en un material ferromagnético, que genera un campo magnético. Los defectos superficiales perpendiculares a las líneas de fuerza producen un campo de fuga del flujo magnético, dicho campo atrae las partículas magnéticas que son adicionadas durante el ensayo, formando indicaciones y revelando así los defectos. Las partículas magnéticas son aplicadas en la superficie de forma seca o húmeda, y pueden ser coloreadas o fluorescentes, también se ha dicho que el tipo de partícula puede afectar la sensibilidad de la inspección en la detección de defectos [3, 7, 8].

La evaluación de la capacidad de las técnicas de ensayo en la detección de defectos se ha convertido en un punto importante para que los inspectores elijan la técnica más adecuada para una determinada aplicación, esta evaluación se logra mediante la estimación de la probabilidad de detección POD. La POD es la probabilidad de detectar un defecto en función de su tamaño usando un ensayo de inspección específico [9-14]. Este concepto aparece a principios de los años 70 en los primeros estudios sobre capacidad de los END en la industria aeroespacial, y desde entonces se ha expandido a otras industrias [13-15]. Sus principales aplicaciones están en el diseño de componentes, mantenimiento de equipos, en la elaboración de procedimientos de inspección y en la evaluación del rendimiento de los inspectores [12, 16]. Investigaciones dentro del campo de la soldadura reportan que esta metodología permite caracterizar la capacidad de inspección de varios métodos, como ensayos por ultrasonido [17], líquidos penetrantes [18, 19] y partículas magnéticas [18, 20].

Las funciones POD de los ensayos no destructivos se estiman a partir de los resultados de la inspección. Cuando los resultados expresan datos binarios, defecto detectado o no detectado, se utiliza el método POD Hit/miss. Por el contrario, si los resultados se basan en una magnitud cuantificada del defecto, se emplea el método POD \hat{a} vs a [11, 13, 21]. Ambos métodos estadísticos permiten graficar la función POD como una curva y obtener un valor denominado $a_{90/95}$, que es el tamaño de defecto detectado de forma fiable por la inspección. Otros valores que muestran las curvas POD son a_{50} y a_{90} referidos al tamaño del defecto para un 50% y 90% de probabilidad de detección respectivamente [11, 21, 22].

Para asegurar la integridad de un componente soldado, el método de partículas magnéticas debe detectar los defectos que generen indicaciones relevantes a fin de comparar su tamaño con criterios de aceptación y rechazo especificadas en las normas industriales. Sin embargo, hay una serie de factores como las técnicas de ensayo y las características del elemento a inspeccionar que generan incertidumbre para la detección de defectos. Por ello, el objetivo del estudio fue determinar la capacidad de detección de defectos en juntas soldadas, al variar la técnica con partículas magnéticas visibles y fluorescentes, mediante la estimación de la probabilidad de detección con el método estadístico \hat{a} vs a .

2. MÉTODO

2.1 Objeto de estudio

Para el estudio se utilizaron 20 muestras de acero estructural soldadas en ranura y filete, fabricadas por Flaw Manufacturing Technology. En la Figura 1 se aprecia su disposición geométrica. Cada muestra contenía defectos superficiales que se caracterizaron con precisión mediante microscopía, utilizando un estereoscopio digital. En total se encontraron 60 defectos en las muestras soldadas, los cuales fueron suficientes para formar el conjunto de datos requerido para estimar las curvas de POD por el método POD \hat{a} vs a [11]. En la Tabla 1 se detallan los defectos y sus respectivos tamaños (longitud) en milímetros.

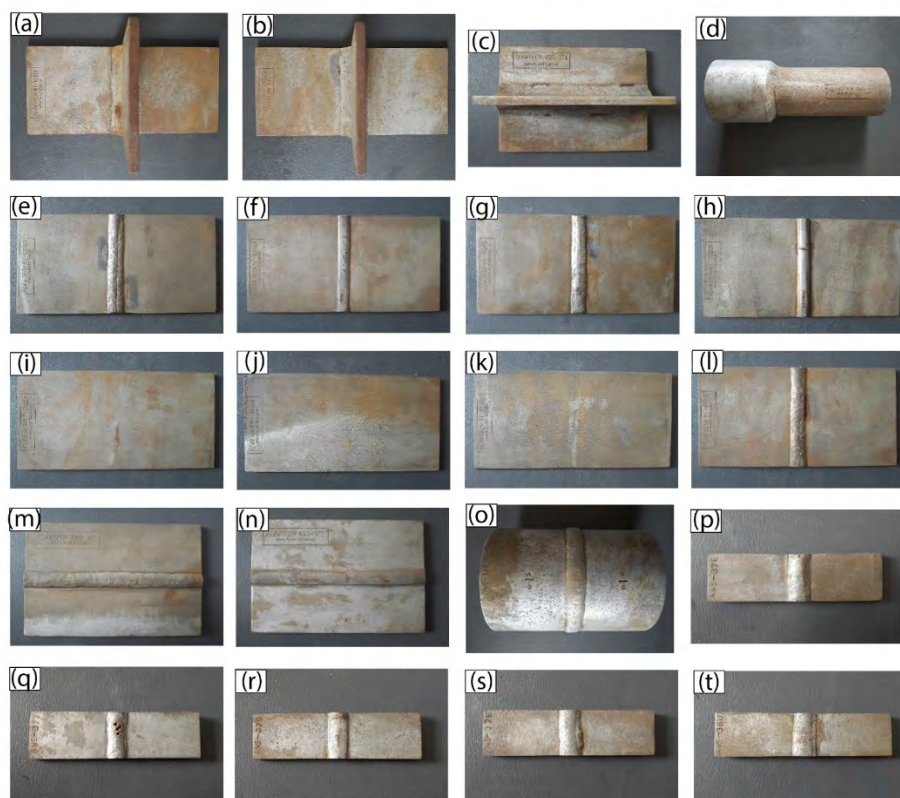


Figura 1. (a-d) soldadura de fillet y (e-t) soldadura de ranura

Tabla 1. Datos de los defectos de las muestras de estudio (tamaño en mm)

ID	Defecto	Tamaño	ID	Defecto	Tamaño	ID	Defecto	Tamaño
1	Fisura ZAC	0,5	21	Fisura en pie	8	41	Fisura ZAC	12,5
2	Fisura ZAC	0,5	22	Fisura línea central	8	42	Solape/Traslape	12,5
3	Porosidad	0,5	23	Fisura ZAC	8	43	Fisura en pie	12,5
4	Cavidad	0,6	24	Fisura línea central	8	44	Porosidad	12,5
5	Fisura línea central	0,625	25	Fisura en pie	8,5	45	Fisura en metal base	12,5
6	Fisura Borde	0,708	26	Laminación	9	46	Fisura ZAC	12,5
7	Fisura ZAC	0,791	27	Porosidad	10	47	Falta de fusión	12,7
8	Fisura en pie	0,916	28	Fisura línea central	10	48	Solape / Traslape	13
9	Fisura en pie	1,75	29	Fisura raíz	10	49	Fisura pie	13
10	Laminación	2	30	Fisura ZAC	10,5	50	Porosidad	13
11	Fisura en pie	3	31	Fisura transversal	10,5	51	Falta de fusión	13,5
12	Fisura en pie	3,5	32	Fisura línea central	10,7	52	Falta de fusión	14
13	Fisura ZAC	5,5	33	Fisura transversal	11	53	Fisura raíz	14,5
14	Fisura en pie	5,5	34	Fisura ZAC	11	54	Fisura ZAC	16
15	Fisura raíz	5,6	35	Fisura en pie	11	55	Fisura raíz	17
16	Fisura raíz	6	36	Fisura ZAC	11	56	Fisura en pie	17,5
17	Fisura ZAC	7	37	Fisura raíz	11,5	57	Fisura línea central	17,75
18	Fisura transversal	7,3	38	Fisura ZAC	11,5	58	Fisura línea central	18,5
19	Falta de Fusión	7,5	39	Fisura en pie	12	59	Laminación	19
20	Porosidad	7,5	40	Solape/Traslape	12	60	Fisura en pie	22

2.3 Procedimiento

Después de identificar y caracterizar los defectos en las muestras de estudio, se desarrollaron inspecciones con partículas magnéticas, para lo cual se contó con un equipo de tres inspectores calificados en ensayos no destructivos. Cada inspector examinó todas las muestras de ensayo utilizando las técnicas de partículas fluorescentes y visibles, de acuerdo al procedimiento de ensayo, elaborado bajo las normas de referencia ASME sección V Artículo 7 [23] y ASTM E 709 [24].

Las superficies de las muestras soldadas fueron preparadas mediante limpieza mecánica, utilizando un cepillo de alambre, y posteriormente limpieza química con removedor base solvente para eliminar cualquier

material que interfiera en el ensayo. La magnetización sobre la superficie de cada elemento de prueba se realizó con un yugo electromagnético Y-7 Magnaflux empleando corriente alterna, luego se planificaron inspecciones variando la técnica con partículas magnéticas rojas Magnavis 8A y fluorescentes Magnaglo 14AM. Las muestras soldadas fueron examinadas bajo las condiciones adecuadas de iluminación descritas en las normas de referencia, y las indicaciones obtenidas en cada muestra fueron dimensionadas con un calibrador vernier y registradas fotográficamente para su posterior análisis.

2.4 Análisis estadístico

Los resultados de las pruebas se basaron en una magnitud cuantificada del defecto, como la longitud de las indicaciones obtenidas, por lo cual la función POD del ensayo se estimó utilizando el método estadístico POD \hat{a} vs a . Para este método, los datos de entrada fueron, el tamaño real del defecto (a) y la respuesta del ensayo (\hat{a}), los cuales deben presentar una correlación lineal, por lo cual, se utilizó un modelo que distribuye los datos de forma adecuada y así se obtuvo una regresión lineal. Hay 4 modelos posibles: 1) \hat{a} vs a , 2) $\log(\hat{a})$ vs a , 3) \hat{a} vs $\log(a)$, y 4) $\log(\hat{a})$ vs $\log(a)$ [11,21].

Además, se consideró que se detecta un defecto cuando la respuesta (\hat{a}) supera un valor de decisión preestablecido ($\hat{a}_{decisión}$), este hecho permitió definir la probabilidad de detección en la ecuación (1).

$$POD(a) = p(\hat{a} > \hat{a}_{decisión}) \quad (1)$$

A partir de una hipótesis de regresión lineal, se tiene la ecuación (2) que permitió obtener las curvas de probabilidad de detección.

$$POD = \Phi\left(\frac{\beta_0 + \beta_1 * a - \hat{a}_{th}}{\delta}\right) \quad (2)$$

Donde, Φ es una ley gaussiana, δ es el término de error y β_0, β_1 son parámetros de regresión que deben estimarse mediante una función de máxima verosimilitud. En el presente estudio se utilizó el software mh1823POD disponible en línea [25] para realizar el análisis estadístico utilizando el método POD \hat{a} vs a descrito y así graficar las curvas POD.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Ensayos de partículas magnéticas

Los resultados en cada muestra de prueba fueron registrados en reportes de inspección (20 reportes). En la Figura 2 se aprecian las indicaciones obtenidas y sus respectivos tamaños dimensionados después de aplicar las técnicas de partículas visibles secas coloreadas y húmedas fluorescentes.


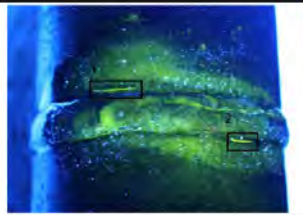
REPORTE DE INSPECCIÓN N° 01					
					
(A) Ensayo con partículas visibles			(B) Ensayo con partículas fluorescentes		
Defectos detectados (indicaciones)					
Técnica de Ensayo	Item	Defecto	Tamaño de las indicaciones (mm)		
			Inspector 1	Inspector 2	Inspector 3
Partículas visibles secas coloreadas	1	Fisura ZAC	16.15	16.09	16.22
	2	Fisura en pie	12.26	11.41	11.86
Partículas húmedas fluorescentes	1	Fisura ZAC	16.1	16.12	16.08
	2	Fisura en pie	11.13	10.72	10.88

Figura 2. Reporte de inspección por partículas magnéticas de una muestra de estudio

3.2 Curvas de probabilidad de detección

Para el análisis estadístico se utilizó el Software mh1823POD mediante el modelo POD \hat{a} vs a , para obtener las curvas de probabilidad de detección de defectos con límites de confianza del 95 %. Se procesaron los datos siguientes: 1) tamaño real de cada defecto (a), 2) tamaño de cada indicación registradas en los reportes de inspección que representan la respuesta del ensayo (\hat{a}) y 3) el valor de decisión ($\hat{a}_{decisión}$), se tomó en cuenta el criterio de relevancia del Código ASME Sección VIII División 1 [26], que señala como indicaciones relevantes las que tengan un tamaño mayor a 1,6 mm. En la Figura 3 se aprecia la curva POD como resultado de los ensayos realizados con la técnica de partículas coloreadas secas visibles y en la Figura 4 se aprecia la curva POD para los ensayos realizados con la técnica de partículas húmedas fluorescentes.

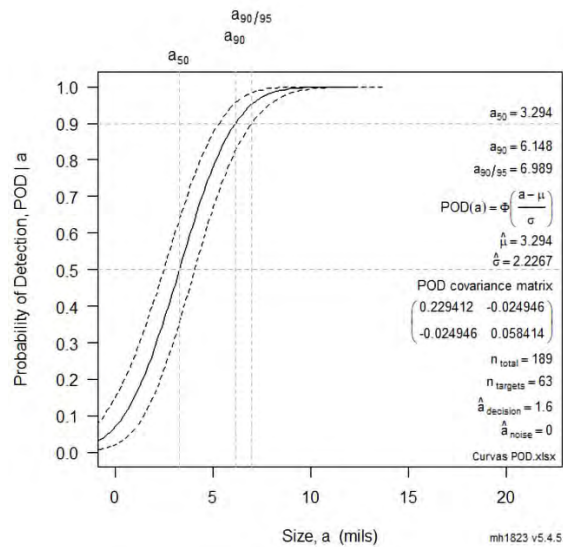


Figura 3. Curva POD de ensayos realizados con la técnica de partículas coloreadas secas visibles

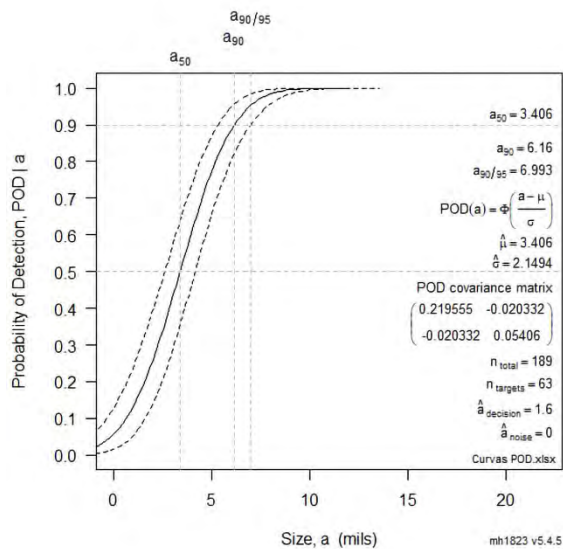


Figura 4. Curva POD de ensayos realizados con la técnica de partículas húmedas fluorescentes

En la Tabla 2, se detallan los valores a_{50} , a_{90} y $a_{90/95}$ obtenidos a partir de las curvas POD, cuando los ensayos fueron realizados por la técnica con partículas secas visibles coloreadas y húmedas fluorescentes.

Tabla 2. Valores a_{50} , a_{90} y $a_{90/95}$ para las técnicas con partículas secas visibles coloreadas y húmedas fluorescentes

TÉCNICA	a_{50} (mm)	a_{90} (mm)	$a_{90/95}$ (mm)
Partículas secas visibles coloreadas	3,294	6,148	6,989
Partículas húmedas fluorescentes	3,406	6,16	6,993

Los resultados demuestran que ambas técnicas de ensayo para la detección de defectos en juntas soldadas por partículas magnéticas presentan un rendimiento similar para la inspección en uniones soldadas bajo el

criterio de relevancia del código ASME, para indicaciones mayores a 1,6 mm ($\hat{a}_{decision} = 1,6$). Sin embargo, la ligera variación en los valores a_{50} (3,294 mm vs 3,406 mm), a_{90} (6,148 mm vs 6,16 mm) y $a_{90/95}$ (6,989 mm vs 6, 6,993 mm), se debe a la diferencia en el tamaño de las indicaciones relevantes. Las indicaciones formadas con partículas magnéticas húmedas fluorescentes son más precisas y cercanas al tamaño real del defecto, esto se explica por presentar mayor sensibilidad, menor tamaño de partícula y están en un medio líquido que les da mayor movilidad para propagarse a las áreas de fuga de flujo magnético, así este método es mejor para indicaciones poco profundas y finas en la superficie, pero se debe tener cierto cuidado en su uso, ya que se pueden adherir con facilidad a la superficie de prueba y generar indicaciones falsas, por otro lado las partículas visibles secas son adecuadas para indicaciones anchas superficiales y sub superficiales y tienen la ventaja de su fácil remoción.

Los resultados POD presentados pueden servir de guía al personal de END para la selección de una técnica de prueba apropiada o en la comparación del método descritos con otros métodos y así tener un buen juicio. Los datos POD no se pueden generalizar para cada proceso o componente, ya que si se cambia cualquiera de los parámetros o variables involucradas en el procedimiento empleado (por ejemplo, equipos, materiales, configuraciones, componentes) los datos POD esperados pueden variar.

4. CONCLUSIONES

La capacidad de detección de defectos en juntas soldadas al variar la técnica de ensayo con partículas magnéticas, estimada mediante el método POD \hat{a} vs a , no se ve influenciada significativamente por el tipo de partícula magnética, así lo muestra el valor de $a_{90/95}$ (6,989 mm vs 6, 6,993 mm) de las curvas POD.

Ambas técnicas de ensayo mostraron similar rendimiento para la detección de defectos por lo cual son adecuadas para las inspecciones de uniones soldadas. Sin embargo, Las indicaciones formadas con partículas magnéticas húmedas fluorescentes son más precisas y cercanas al tamaño real del defecto.

Es necesario ampliar la investigación considerando otras variables operativas, como equipos empleados, técnica de magnetización, tipo de corriente, factores humanos, entre otros que intervienen en el ensayo de partículas magnéticas y contribuir a tener un panorama más profundo sobre la probabilidad de detección de cada técnica de ensayo empleada.

REFERENCIAS

- [1] Cawley P. (2001). Non-destructive testing - current capabilities and future directions. Design and Applications 215(4), 213-23.
- [2] Ospina R. et al. (2011). Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas. Scientia Et Technica 16(48), 196-201.
- [3] Smith R. (2015). Non-destructive testing (NDT) - Guidance document: An Introduction to NDT common methods. The British Institute of Non-Destructive Testing.
- [4] Rincón S. et al. (2015). Técnica de partículas magnéticas: Caso del laboratorio del CAMAN. Ciencia y Poder Aéreo 10(1), 59-70.
- [5] Ashok K. (2017). Non-destructive testing, evaluation of stainless steel materials. Materials Today Proceedings 4(8), 7302-7312.
- [6] Deepak J. et al. (2021). Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. Materials Today Proceedings 44, 3732-3737
- [7] American Society Nondestructive Testing. (2013). ASNT Level III Study Guide: magnetic particle testing method. American Society for Nondestructive Testing.
- [8] Eisenmann D. et al. (2014). Review of progress in magnetic particle inspection. AIP 1581, 1505-1510.
- [9] Keprate A. (2016). Probability of Detection: History, Development and Future. Pipeline Technology Journal 8, 41-45.
- [10] Rummel W. (2013). A Path Forward for NDE Reliability. En 5th European American Workshop on Reliability of NDE. Berlin, Germany.
- [11] Department of Defense USA. (2013). Nondestructive evaluation system reliability assessment. MIL-HDBK-1823A. Department of Defense Handbook.
- [12] Georgiou G. (2006) Probability of detection (PoD) curves, Derivation, application and limitations. Jacobi Consulting Limited.

- [13] Berens A. (1989). NDE reliability data analysis, in: ASM metals handbook - nondestructive evaluation and quality control. ASM International 17, 689–701.
- [14] Rummel W. (1998). Probability of detection as a quantitative measure of nondestructive testing end-to-end process capabilities. *Materials Evaluation* 56(1), 29-35.
- [15] Yee B. et al. (1976). Assessment of NDE Reliability Data. NASA CR-134991. National Aeronautics and Space Administration.
- [16] Silva R. y Padua G. (2012). *Nondestructive Inspection Reliability: State of the Art*. IntechOpen.
- [17] Kurz J. et al. (2012). Probability of Detection (POD) determination using ultrasound phased array for considering NDT in probabilistic damage assessments. En 18th WCNDT. Durban, South Africa.
- [18] Fonseca R. et al. (2014). Study of probability of the detection of defects in welded joints of the techniques of magnetic particle and penetrant testing. Recuperado: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=15550>
- [19] Zolfaghari A. y Kolahan F. (2017). Reliability and sensitivity of visible liquid penetrant NDT for inspection of welded components. *Materials Testing* 59, 290-294.
- [20] Zolfaghari A. et al. (2018). Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the surface cracks of welded components. *Nondestructive Testing and Evaluation* 33(3), 290-300.
- [21] Virkkunen I. et al. (2019). Comparison of \hat{a} Versus a and Hit/Miss POD-Estimation Methods: A European Viewpoint. *Journal of Nondestructive Evaluation* 38, 89.
- [22] Reseco M. et al. (2017). Implementation of a robust methodology to obtain the probability of detection (POD) curves in NDT: integration of human and ergonomic factors. En COFREND 2017. Strasbourg, France.
- [23] American Society Mechanical Engineers. (2021). ASME BPVC Section V Nondestructive Examination. American Society of Mechanical Engineers.
- [24] American Society Testing and Materials. (2021). ASTM E709: Standard Guide for Magnetic Particle Testing. American Society for Nondestructive Testing.
- [25] Annis C. (2018). Statistical best-practices for building Probability of Detection (POD) models, R package mh1823 POD, version 5.4.5. Recuperado: <https://statistical-engineering.com/>
- [26] American Society of Mechanical Engineers. (2021). ASME Section VIII Division 1: ASME Boiler and Pressure Vessel Code. American Society of Mechanical Engineers.

Evaluación numérica de la estabilidad direccional de grieta bajo esfuerzos biaxiales

Martín Iván Correa Corona¹
Guillermo Urriolagoitia Sosa²
Francisco Javier Gallegos Funes³
Instituto Politécnico Nacional
México

El inicio de la mecánica de la fractura se remonta a la separación del supercontinente llamado Pangea y el desarrollo de las primeras herramientas elaboradas por primates para sobrevivir, hasta la actualidad, donde se utiliza para el diagnóstico de los distintos elementos mecánicos. La mecánica de la fractura es la rama de la Ingeniería del pasado, presente y futuro, porque describe el estudio y el comportamiento de la presencia de grietas en la estructura del material de cualquier elemento mecánico o mecano-biológico. En este trabajo se presenta el desarrollo de una simulación numérica para conocer los efectos de una carga biaxial en un diente de engrane en contacto con el engrane compañero mediante el uso de la herramienta ANSYS®, que trabaja desarrollando el principio del método de elemento finito para observar de manera virtual el campo de esfuerzos en la geometría de un diente de engrane. De esta manera se obtiene un diagnóstico del comportamiento del elemento mecánico de manera virtual para predecir la conducta del mismo diente de engrane en la vida real.

¹ Magíster en Ingeniería Mecánica.

Contacto: ingenieria.ivan.95mail.com, mcorreac1000@alumno.ipn.mx

² Doctor en Filosofía.

Contacto: guiurri@hotmail.com

³ Doctor en Comunicaciones y Electrónica.

Contacto: fgallegosf@ipn.mx

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la mecánica de la fractura en la actualidad es una herramienta muy importante ya que permite desarrollar un criterio sobre los elementos mecánicos y estructurales que se utilizan actualmente en la industria, dicho estudio que se ha mantenido en constante evolución con el pasar de los años, de tal manera que hoy en día se disponen de simulaciones virtuales regidos sobre el método de elemento finito el cual permite obtener un resultado virtual lo más parecido al resultado que se presentaría en la realidad así como la clara visualización del comportamiento derivado de la concentración de esfuerzos en el medio continuo del elemento mecánico sometido a estudio.

Por lo cual la mecánica de la fractura es la rama de la Ingeniería del pasado, presente y el futuro, ya que describe el estudio y el comportamiento de la presencia de grietas en la estructura del material de cualquier elemento mecánico o mecano biológico [1-3].

A continuación, se muestra una simulación utilizando el MEF específicamente aplicado sobre un diente de engrane con una geometría plena, seleccionada y desarrollada, obteniendo el campo de máximos esfuerzos al que se encuentra sometido, de esta manera se puede observar la localización de la zona más vulnerable de un diente de engrane.

Finalmente, se muestra una simulación del diente de engrane seleccionado mediante el MEF y se aplica la propuesta de una grieta en su estructura, para lo cual se puede observar el comportamiento de una grieta sobre el medio continuo del diente y observando el aumento de esfuerzos principales en la punta de la grieta, determinando así el campo de máximos esfuerzos principales como también la dirección de la extensión de la grieta de manera perpendicular al campo de máximos esfuerzos principales, obteniendo un diagnóstico del elemento mecánico y generando un criterio para el usuario.

2. MÉTODO

Es conveniente señalar que el elemento a diseñar es específicamente lo denominado diente del engrane. El diente de un engrane es usado para transmitir potencia desde un elemento conductor denominado piñón (de menor diámetro) hasta un elemento conducido denominado engrane (de mayor diámetro), a continuación, se muestran las medidas del diente engrane que será objeto de estudio (Tabla 1) [4].

Tabla 1. Características del diente de engrane

Módulo	$m = 50$
Paso circular	$P = 157,07$ mm
Adendum	$Ha = 50$ mm
Dedendum	$Hf = 62,5$ mm
Diámetro exterior	$De = 1100$ mm
Diámetro primitivo	$Dp = 1000$ mm
Diámetro de raíz	$Di = 875$ mm
Espesor del diente	$S = 78,54$ mm

Normalmente la potencia es suministrada hacia el piñón por un motor que gira a alta velocidad, en el caso de motores eléctricos, es común tener velocidades de 3600 rpm, 1800 rpm, 900 rpm etc. [5]. Por lo que las fuerzas o los pares suministrados por dichos motores, son función de los Hp disponibles a la velocidad de rotación del motor, las velocidades tangenciales en el círculo de paso o bien los rpm del motor que suministra la potencia [4].

La magnitud de la fuerza o bien del par que se puede suministrar a un sistema de engranes está definida como ya se indica por la ecuación (1).

$$F = \frac{33000 \cdot hp}{vt} = \text{libras O}$$

$$T = \frac{63000 \cdot hp}{rpm} = \text{libras pie} \quad (1)$$

Donde:

H_p = potencia

V_t = velocidad tangencial

Rpm = revoluciones por minuto

A continuación, se desarrollará el análisis sobre el perfil del diente de engrane tomando en cuenta las tres fases en las que este efectúa normalmente cualquier trabajo para transmitir potencia de un engrane a otro teniendo tres cargas diferentes a lo largo de su perfil (Figura 1) así también restringiendo todos los grados de libertad para un elemento 2D en la base del diente [6].

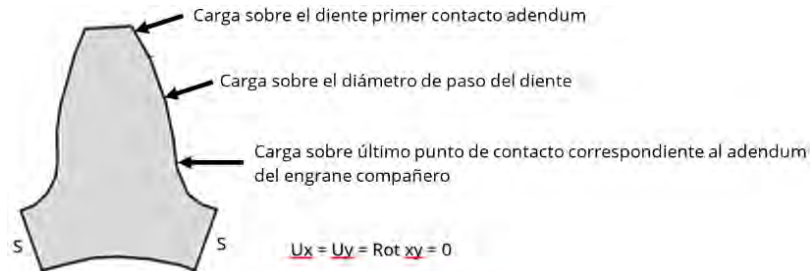


Figura 1. Análisis de cargas puntuales

2.1 Análisis de carga puntual en el primer caso de estudio

Para la primera fase del diente, la carga se aplica en la punta del diente caracterizada por estar en el diámetro exterior y se determina de la ecuación (1). La carga que se aplica en el diente del engrane determinada por F se definió como 638,6984 lb o 289,71 kg o 2841,0845 N/mm (Figura 2) [5].

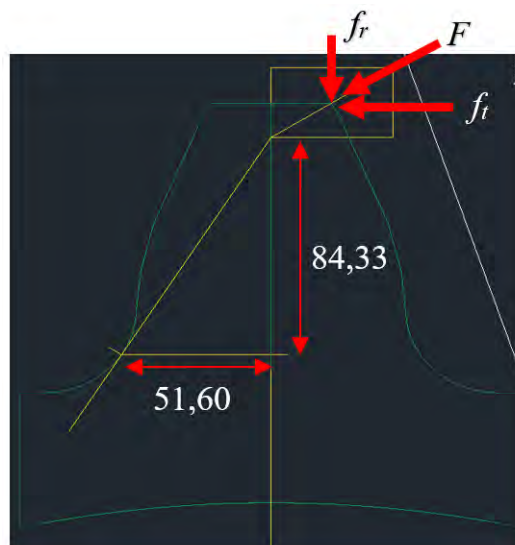


Figura 2. Análisis de carga puntual en el primer caso de estudio

Como se mencionó anteriormente, se determinó la fuerza que se aplicará específicamente en el extremo superior del diente en el diámetro exterior. Sin embargo, al momento en que se realizará la simulación numérica llevada a cabo por la herramienta computacional ANSYS®, no será posible aplicar una fuerza en el perfil del diente del engranaje, ya que el ángulo de aplicación de esta fuerza no es específicamente permitido en el programa, ya que solamente se podrá desarrollar dicha simulación numérica otorgando valores aplicados sobre los ejes X y Y (Figura 2) y así poder desarrollar la simulación numérica [7].

Para determinar estos valores, se sabe que el ángulo de aplicación de la fuerza ya calculada es de $32,33^\circ$ en todas sus áreas de aplicación, debido a que la curva de la involuta en el engranaje determina ese valor de aplicación. A continuación, se determina el valor de la fuerza tangencial (F_t) y la fuerza radial (F_r) para expresar las fuerzas que serán aplicadas en la simulación numérica llevando a cabo las siguientes ecuaciones (ecuaciones (2) y (3)) [7, 8].

$$F_t = F * \cos \theta = 2841,0845 \text{ N/m} * \cos 32,33^\circ = 2400,6650 \text{ N/m} \quad (2)$$

$$F_r = F * \sin \theta = 2841,0845 \text{ N/m} * \sin 32,33^\circ = 1519,39 \text{ N/m} \quad (3)$$

2.2 Análisis de carga puntual en el segundo caso de estudio

Como se observó, estos los valores de la carga específicamente sobre el diente del engranaje teóricamente cuando este se encuentra en su primera fase de contacto. Sin embargo, los valores cambian cuando estos continúan trabajando y la zona de contacto cambia, como ésta carga se desplaza por el cuerpo de su estructura, hasta que se tiene un contacto en el diámetro primitivo del diente. Para lo cual, de la misma manera, se determinó la fuerza F para el segundo caso de estudio definida por $702.56 \frac{\text{lb}}{\text{pie}}$ o 318.68 Kgf o $3,125.1832 \text{ N/mm}$ (Figura 3).

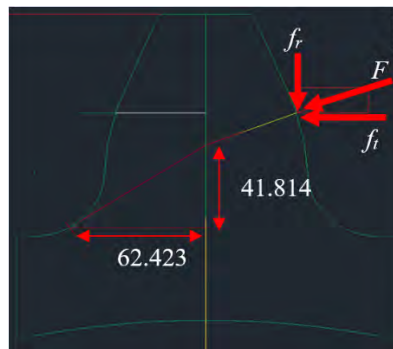


Figura 3. Análisis de carga puntual en el segundo caso de estudio

Al igual que anteriormente se determinó que en la herramienta computacional que será utilizada para realizar la simulación numérica de dicho elemento mecánico, es necesario determinar los valores de F_t y F_r ya que debido al ángulo den el que se encuentra aplicada la fuerza no será posible determinarlo de manera directa. Para lo cual, se requiere calcular las fuerzas ejercidas sobre los ejes X y Y (Figura 3) las cuales se determinan de la manera siguiente en las ecuaciones (ecuaciones (4) y (5)).

$$F_t = F * \cos \theta = 3,125.1832 \frac{\text{N}}{\text{m}} * \cos 20^\circ = 2,936.7115 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (4)$$

$$F_r = F * \sin \theta = 3,125.1832 \frac{\text{N}}{\text{m}} * \sin 20^\circ = 1,068.8756 \text{ N/m} \quad (5)$$

2.3 Análisis de carga puntual en el tercer caso de estudio

De la misma manera se determina la carga y el esfuerzo cuando el diente del engranaje llega a su fase final en el diámetro de raíz. Para lo cual se obtiene que la fuerza definida para este tercer caso de estudio es de $803,1458 \text{ lb}$ o $364,3 \text{ Kgf}$ o $3572,5625 \text{ N/mm}$ (Figura 4).



Figura 4. Análisis de carga puntual en el tercer caso de aplicación

Como en los casos anteriores, este es el valor que actúa sobre el perfil del diente, pero en este caso se encuentra en la última fase de trabajo del diente de engrane. A diferencia de los dos casos anteriores, en

este caso, la frontera del diente se encuentra de manera vertical para lo cual no es necesario calcular ningún ángulo y es posible introducirlo en la herramienta computacional *ANSYS®* siendo éste aplicado de manera perpendicular a la geometría del elemento mecánico obteniendo un ángulo de cero grados aplicando la carga tal y como se obtuvo, para de esta manera mostrar la simulación de dicha carga en este punto puntual de trabajo, el cual se desarrolla como en la Figura 4 [7, 9].

2.4 Simulación numérica

Para realizar el diseño del modelo numérico del elemento mecánico que será objeto de estudio, es importante determinar las propiedades de dicho elemento mecánico, tales como el material en el que se fabricara este engranaje. Para lo cual, se utilizará un acero cuya relación entre el esfuerzo (σ) y la deformación unitaria (ϵ) es de 200 GPa y una relación de *Poisson* de 0,28, manteniendo la integridad de la estructura dentro de las propiedades lineales de los materiales conservando dentro del análisis el comportamiento ideal para la estructura.

Con el supuesto de que el material también se comporta de manera ideal considerando que se adapta a los dogmas de la mecánica clásica abarcando linealidad, continuidad, homogeneidad e isotropía [7, 10].

2.5 Análisis del diente con carga aplicada de $2841,0845 \text{ N/mm}^2$

La carga será aplicada en el diámetro exterior del engrane (círculo de addendum) específicamente sobre el nodo 16. Las condiciones de frontera consideradas son todos los nodos de la parte inferior de la sección del diente, así como, los laterales que quedarían ubicados dentro de la sección del diente están anclados y no se les permite movimiento. Esto será aplicado en todos los casos que se estudiaran y no se mencionara las condiciones fronteras para todos los casos que a continuación se efectúen, pero si se aplicaran.

2.6 Diente de engrane si falla

Se llevo a cabo el análisis por medio del elemento finito, obteniéndose los resultados relativos a valores de esfuerzos para cada uno de los elementos que conforman el medio continuo de la estructura (diente de engrane). Con estos resultados fue posible mapear los campos de esfuerzo de interés, esto es isopáquicas e isoentáticas. En la Figura 5 se muestran gráficamente por colores el estado de campo de isopáquicas para el caso de diente sin falla sometido a carga en el círculo exterior [6].

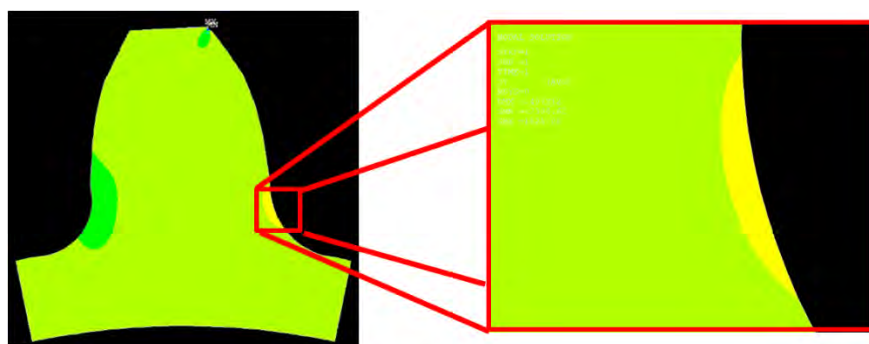


Figura 5. Campo de isopáquicas obtenido debido a la carga sobre el círculo exterior del diente del engrane

Se puede ver claramente en la Figura 5, existe una zona en la parte inferior del diente, concretamente en la zona de la trocoide en la que se va a presentar una concentración de esfuerzos, en esta figura aparece con color amarillo (es de hacer notar que, en la zona de aplicación de la carga, también aparece una zona de concentración, pero esta no será considerada como posible zona de falla).

Claramente en esta zona se están generando esfuerzos de tensión por efecto de la carga aplicada y se procederá a mapear el nivel específico de esfuerzo en cada nodo que existe en esta zona de interés, con objeto de determinar el punto de máximo esfuerzo principal. A continuación, en la Tabla 2 se proporcionan los valores obtenidos por medio del *MEF* de los esfuerzos principales en la zona de la trocoide.

Tabla 2. Valores de máximo esfuerzo principal sobre los nodos en la zona de la trocoide

Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)
23815	172,68	40905	166,45	23829	173,98	40991	157,72
23817	173,30	40904	166,65	40910	163,80	40990	158,36
23819	173,077	40903	166,73	40909	164,65	40989	159,71
23821	174,08	40902	166,66	40908	165,37	40988	281,88
23823	174,27	40901	166,44	40907	166,01	40987	277,19
23825	174,31	40993	157,00	40906	166,37	40986	321,35
23827	174,21	40992	157,32				

Estos valores al ser mapeados sobre la zona de la trocoide aparecen como en la Figura 6, donde se observa que, a partir del mapeo que se tiene que los nodos en la zona de la trocoide, se puede graficar por color la zona de esfuerzos, por lo que es posible afirmar que el nodo 23825 es el punto de inicio de fractura ya que tiene el mayor nivel de esfuerzos.

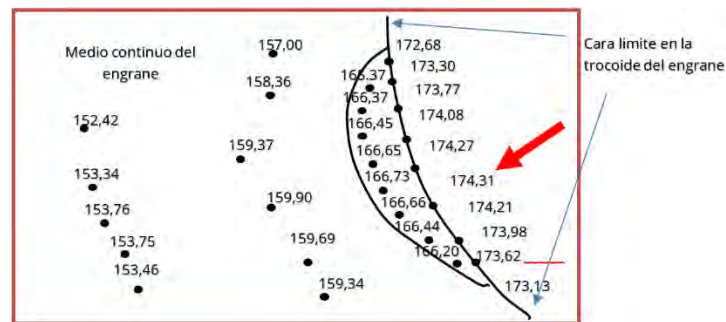


Figura 6. Localización de los nodos de la malla y nivel de esfuerzo al que están sujetos debido a la carga sobre el círculo exterior del diente del engrane

Uno de los aspectos más importantes para desarrollar el análisis referente a la simulación de grietas el análisis numérico al que se encuentra sometido ya que, como se observó en el primer análisis, el método numérico ofrece mejor visualización sobre el comportamiento de estructuras o elementos mecánicos sometidos a cargas axiales.

Una aproximación a la acción de agentes externos más a la realidad en comparación con estudios analíticos ya que si bien los resultados que expresan ambos análisis son muy similares, siempre tendrá un rango de error, por lo que realizar una comparación entre ambos análisis permite el desarrollo de un criterio para el usuario. Así como determinar si el análisis se encuentra de manera correcta y dentro límites aceptables para casos de estudio determinados [11].

2.7 Diente de engrane con falla propuesta de 1 mm

Diversos autores *Griffith* 1920, *Obreimoff* 1930, *Cottrell* 1965, etc, al hablar de dirección de propagación de fractura, han propuesto que una vez que se localiza el punto de inicio de falla, esta se propagara en una dirección perpendicular al máximo campo de esfuerzo principal [12, 13]. Por lo que, habiendo definido que el punto de inicio de fractura debe ser el nodo 23825, se propone ahora ubicar a partir de ese nodo una fractura con dirección perpendicular a la superficie del diente del engrane y en la dirección indicada.

Se llevó a cabo el análisis de esta estructura (diente con falla) por medio del elemento finito, obteniéndose los resultados relativos a valores de esfuerzos máximos principales para cada uno de los elementos que conforman el medio continuo de este diente de engrane [4, 6]. Con estos los resultados fue posible mapear los campos de esfuerzo de interés, esto es, isopaquicas e isoentaticas. En la Figura 7 se muestra el campo de isopaquicas.

Analizando ahora los resultados obtenidos que se describen por el patrón de isopáquicas, es necesario dirigir la atención a la zona de la punta de la fractura y desarrollar un análisis del campo mapeado en a la zona de la punta de la fractura, para lo cual se procederá como sigue. En la Tabla 3 se consignan los valores de los esfuerzos obtenidos para los modos en la vecindad de la punta de la fractura (1 mm) [14, 15].

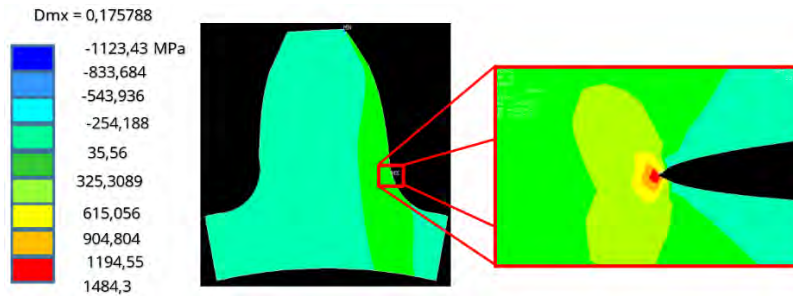


Figura 7. Campo de isopaquicas del engrane con fractura de 1 mm, obtenido cuando se aplica carga sobre el círculo exterior del engrane

Tabla 3. Valores de máximo esfuerzo principal sobre los nodos en la punta de la grieta de 1 mm con carga aplicada sobre el círculo exterior

Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)
28472	1505,3	28792	240,70	28784	513,95	75098	311,18
32149	323,53	75122	237,46	28782	667,71	74693	221,18
32048	428,77	75011	263,91	28780	1014,5	75149	251,78
32146	461,20	75010	300,39	75148	289,04	75147	297,71
28790	279,98	75097	409,77	74783	311,80	75073	528,83

Se procede ahora a mapear el campo de isopaquicas en la zona de la punta de la fractura, esto se muestra en la Figura 8 [16].

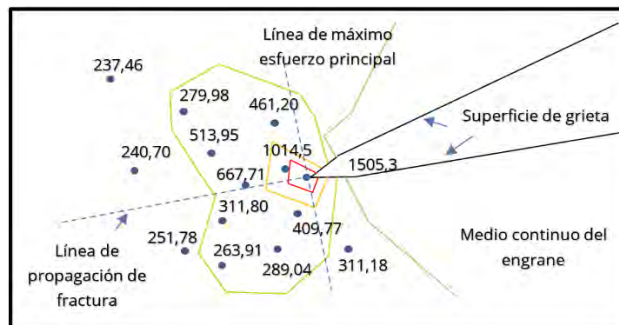


Figura 8. Localización de los nodos de la malla y nivel de esfuerzo al que están sujetos debido a la carga sobre el círculo exterior del diente del engrane

Claramente es posible observar que, a partir del mapeo, que se tiene de los nodos en la zona de la punta de la fractura, se puede graficar por color la zona de máximos esfuerzos principales, lo que se muestra en la Figura 8. la propagación de la fractura emana de la punta de la grieta y tiene una dirección perpendicular a la línea de máximo esfuerzo principal [17]. Por lo que la agrieta se extenderá en la dirección mostrada, la cual está virtualmente en el plano de la fractura. A continuación, se muestran los campos de isopáquicas para extensiones de grieta directamente de 10 mm (Figura 9). Finalmente, es de hacer notar que las líneas de extensión de fractura conservaron su dirección ya que estaban dictadas por los campos de esfuerzo de las isopáquicas y estas siempre conservaron su perpendicularidad con respecto a las líneas de máximo esfuerzo principal.

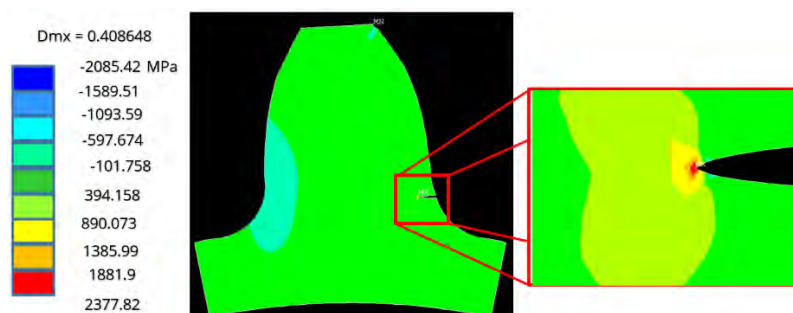


Figura 9. Campo de isopáquicas del engrane con fractura de 10 mm, obtenido cuando se aplica carga sobre el círculo exterior del diente del engrane

2.8 Análisis del diente de engrane sin falla con carga aplicada de $3125,1832 \text{ N/mm}^2$ sobre el círculo de paso

Se llevo a cabo el análisis por medio del elemento finito, obteniendo los valores de esfuerzos para cada uno de los elementos que conforman el medio continuo de la estructura (diente de engrane). Con estos resultados fue posible mapear los campos de esfuerzo de interés, esto es isopaquicas e isoentaticas. En la Figura 10 se muestran gráficamente por colores el campo de isopaquicas para el caso de diente sin falla sometido a carga aplicada en el círculo de paso.

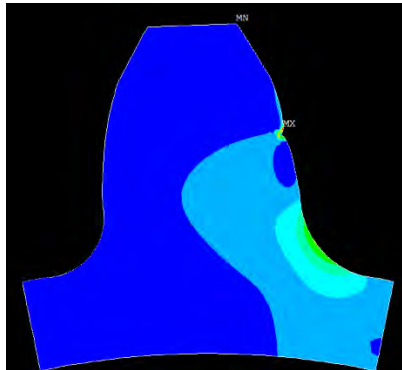


Figura 10. Carga aplicada sobre el círculo de paso del diente del engrane

Se puede ver claramente en la figura 10 que existe una zona en la parte inferior del diente, concretamente en la zona de la trocoide en la que se va a presentar una concentración de esfuerzos, en esta figura aparece con color verde. (es de hacer notar que, en la zona de aplicación de la carga, también aparece una zona de concentración, pero esta no será considerada como posible zona de falla) [17, 18].

Claramente, en esta zona se están generando esfuerzos de tensión, por la carga aplicada. Se ejecuta el programa ANSYS y se obtiene la solución del problema, a partir de esto se examina la zona de interés para lo cual, en la siguiente Tabla 4, se enlistan los valores de máximos esfuerzos principales para cada nodo. los niveles específicos de esfuerzo para cada uno de los elementos finitos que integran la malla y a partir de esto se obtiene el patrón de isopáquicas [19].

Tabla 4.- Valores de máximo esfuerzo principal sobre los nodos en la zona de la trocoide con carga aplicada sobre el círculo de paso del diente del engrane

Nodo	σ_{\max} (MPa)	Nodo	σ_{\max} (MPa)	Nodo	σ_{\max} (MPa)	Nodo	σ_{\max} (MPa)
8025	210,04	15032	187,60	8037	217,69	15082	190,80
8027	213,79	15033	190,36	8039	216,73	15083	189,09
8029	216,80	15034	190,93	8041	214,075	15089	197,58
8031	217,69	15035	191,98	8043	212,30	14952	167,15
8033	205,06	15037	191,10	8045	208,10	14953	168,38

Estos valores de esfuerzo al ser mapeados, sobre la zona de la trocoide, aparecen de la siguiente forma (Figura 11).

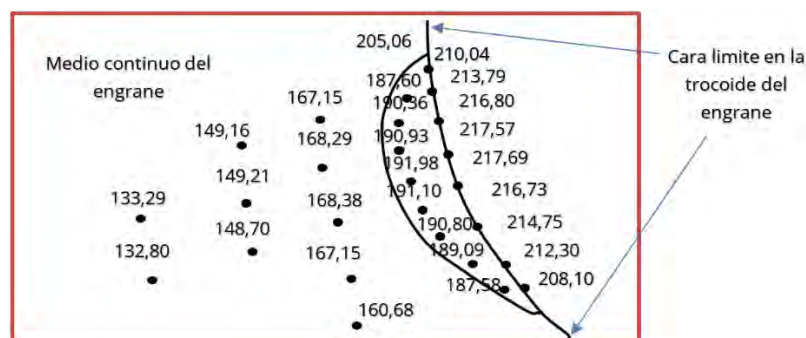


Figura 11. Localización de los nodos de la malla y nivel de esfuerzo al que están sujetos debido a la carga aplicada sobre el círculo de paso del diente del engrane

Nuevamente es posible observar que a partir del mapeo que se tiene que los nodos en la zona de la trocoide, se puede graficar por color la zona de esfuerzos, lo que se muestra en la figura 11. Con base en lo expuesto, así como lo que se observa ahora, Figura 11, es posible afirmar que el nodo 8037 es el punto de inicio de fractura ya que tiene el mayor nivel de esfuerzo [20, 21].

2.9 Diente de engrane con falla propuesta de 1 mm

Se procede ahora a analizar el diente con una grieta de 1 mm de extensión por medio del elemento finito. Obteniéndose los resultados relativos a valores de esfuerzos máximos principales para cada uno de los elementos que conforman el medio continuo de este diente de engrane. Con estos resultados fue posible mapear los campos de esfuerzo de interés, esto es, isopáquicas e isoentáticas. En la Figura 12 se muestra el campo de isopáquicas.

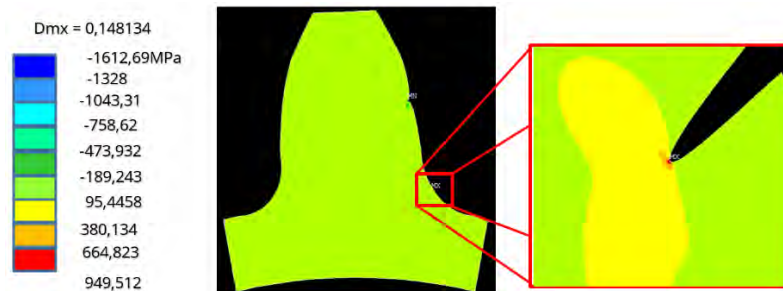


Figura 12. Campo de isopáquicas del engrane con fractura de 1 mm, obtenido cuando se aplica carga aplicada sobre el círculo de paso del diente del engrane

Analizando ahora los resultados obtenidos que se describen en el patrón de isopáquicas, es necesario dirigir la atención a la zona de la punta de la fractura y desarrollar un análisis del campo mapeado en la zona de la punta de la grieta, para lo cual se procede como sigue. En la Tabla 5 se consignan los valores de los esfuerzos obtenidos para los nodos en la vecindad de la zona de interés, considerando una grieta con una extensión de 1 mm, a partir del punto de máximo esfuerzo principal.

Tabla 5. Valores de máximo esfuerzo principal sobre los nodos en la punta de la grieta de 1 mm con carga aplicada sobre el círculo de paso del diente del engrane

Nodo	σ_{\max} (MPa)	Nodo	σ_{\max} (MPa)	Nodo	σ_{\max} (MPa)	Nodo	σ_{\max} (MPa)
29695	1402,2	108425	444,37	107978	303,11	30112	409,02
108541	442,77	108573	439,95	93555	358,54	30114	310,23
93556	316,55	30108	774,63	108542	662,55	39687	490,85
108572	556,60	30110	532,09	108426	360,67	39001	146,26

Se mapeará ahora el campo de isopáquicas en esta zona, esto se muestra en la Figura 13. Es posible observar que, a partir del mapeo, se tiene de los nodos en la zona de la punta de la fractura, se puede graficar por color la zona de máximos esfuerzos principales, lo que se muestra en la Figura 13.

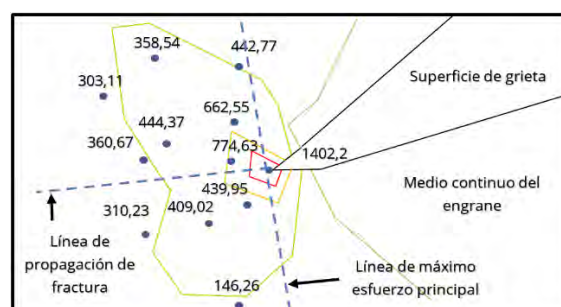


Figura 13. Localización de los nodos de la malla y nivel de esfuerzo al que están sujetos debido a la carga aplicada sobre el círculo de paso del diente del engrane

La propagación de la fractura emana de la punta de la grieta y tiene una dirección perpendicular a la línea de máximo esfuerzo principal que pasa por ese punto [22, 23]. Por lo que la grieta se extenderá en la

dirección propuesta en la Figura 14 (con extensión de 10 mm), esta extensión se da virtualmente en el plano de la fractura. Finalmente, es de hacer notar que las líneas de extensión de fractura conservaron su dirección, ya que estaban dictadas por los campos de esfuerzo de las isopáquicas y siempre conservaron su perpendicularidad con respecto a las líneas del campo de máximo esfuerzo principal [24, 25].

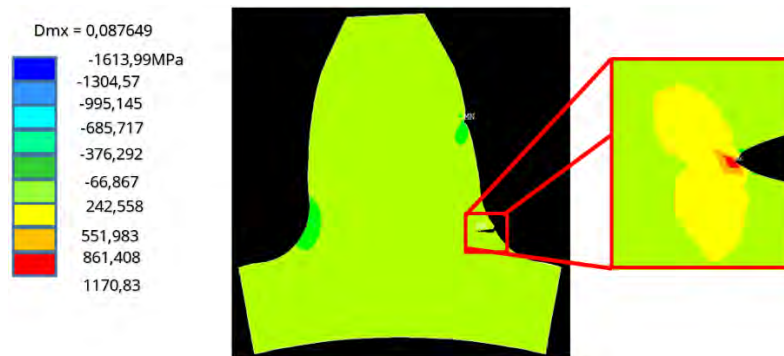


Figura 14. Grieta corregida de 10 mm

2.10 Análisis del diente con carga aplicada de $3572,5625 \text{ N/mm}^2$

En el diámetro de base del engrane, específicamente sobre el punto de salida de contacto. El punto de salida del engrane compañero se ubica sobre el engrane actual, a una distancia equivalente a su adendum esto es diámetro de paso menos dos por adendum ($1000 - (2 \text{ veces su adendum} * 50) = 900 \text{ mm}$). Por otro que se considerará la aplicación de una carga de $3572,5625 \text{ N/mm}^2$, y las condiciones fronteras ya mencionadas.

2.11 Análisis del diente de engrane sin falla, con carga aplicada de $3572,5625 \text{ N/mm}^2$

Con objeto de ubicar el punto de probable inicio de falla, se llevó a cabo un análisis por medio del elemento finito, obteniendo los valores de esfuerzos para cada uno de los elementos de la malla que conforma el medio continuo de la estructura (diente de engrane).

Con estos resultados fue posible mapear los campos de esfuerzo de interés, esto es isopáquicas e isoentáticas. En la Figura 15 se muestran gráficamente por colores el campo de isopáquicas para el caso de diente sin falla sometido a carga aplicada en el círculo del punto de salida del diente.

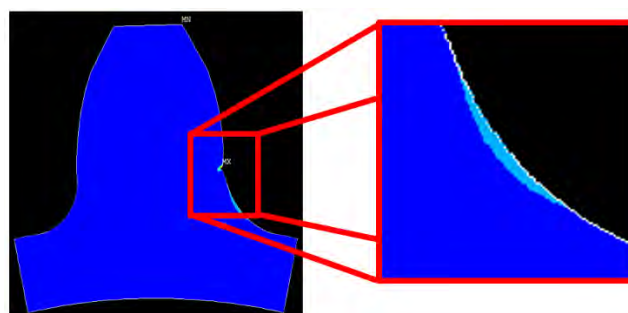


Figura 15. Carga aplicada sobre el círculo base del diente del engrane (último punto de contacto)

Es de esperarse para la figura anterior que exista una zona en la parte inferior del diente, en la zona de la trocoide donde se espera el máximo nivel de esfuerzos. Se aplica el programa ANSYS a la solución del problema bajo estudio para obtener los valores de campos de máximos esfuerzos principales de cada uno de los nodos de la zona de interés, esto se muestra en la Tabla 6 a continuación.

Estos valores de esfuerzo al ser mapeados, sobre la zona de la trocoide, aparecen de la Figura 16. A partir del mapeo de los esfuerzos que se tiene de los nodos en la zona de la trocoide, se puede graficar por color, la zona de esfuerzos, lo que se muestra en la figura 16. Ya se mencionó en los procesos anteriores y se discutió ampliamente lo relativo al punto de inicio de fractura, con base en lo ahí expuesto, así como lo que se observa ahora, Figura 16, es posible afirmar que el nodo 8031 es el punto de inicio de fractura ya que tiene el mayor nivel de esfuerzo.

Tabla 6. Valores de máximo esfuerzo principal sobre los nodos en la zona de la trocoides, con carga sobre el círculo base del diente del engrane

Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)
8019	150,06	15030	141,54	8033	151,85	15037	143,80
8021	150,65	15031	142,22	8035	151,68	15038	143,71
8023	151,12	15032	142,78	8037	151,41	15039	142,89
8025	151,48	15033	143,20	8039	151,04	14950	133,66
8027	151,73	15034	143,20	14951	134,36	14952	134,97
8029	151,88	15035	143,72	1453	135,41	14954	135,79
8031	151,91	15036	143,82	14955	136,10	14956	136,15

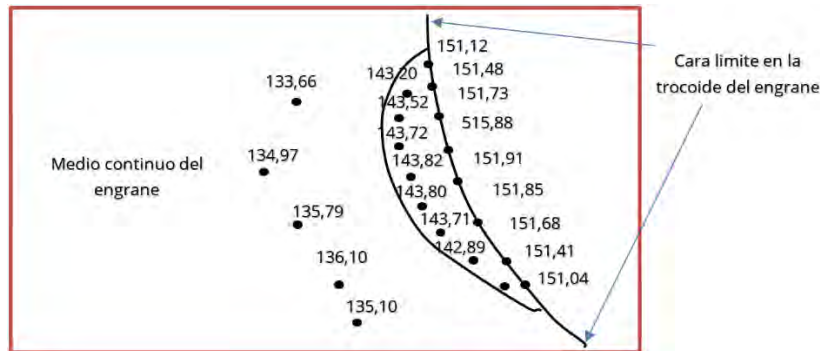


Figura 16. Localización de los nodos de la malla y nivel de esfuerzo al que están sujetos debido a la carga aplicada sobre el círculo base del diente del engrane

2.12 Diente de engrane con falla propuesta de 1 mm

Se procede ahora a analizar el diente con una grieta de 1 mm de extensión. Obteniéndose los resultados relativos a valores de esfuerzos máximos principales para cada uno de los elementos que conforman el medio continuo de este diente de engrane. Con estos resultados fue posible mapear los campos de esfuerzo de interés, esto es, isopáquicas e isoentáticas, como se muestra en la Figura 17.

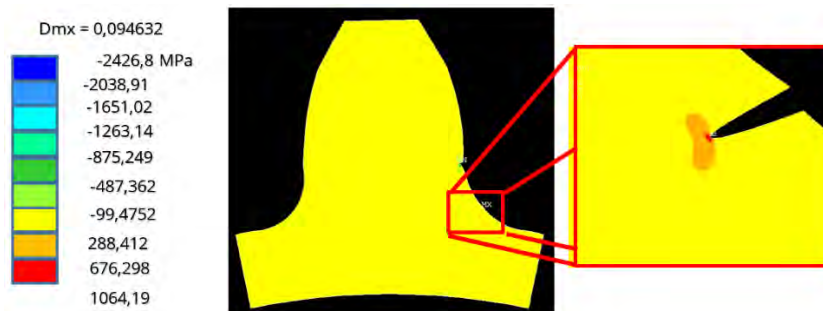


Figura 17. Campo de isopáquicas obtenido debido a la carga aplicada sobre el círculo base del diente del engrane

Analizando ahora los resultados obtenidos que se describen en el patrón de isopáquicas, es necesario dirigir la atención a la zona de la punta de la fractura y desarrollar un análisis del campo mapeado en la zona de la punta de la grieta. En la Tabla 7 se consignan los valores de los esfuerzos obtenidos para los nodos en la vecindad de la zona de interés, considerando que esta primera grieta tiene una extensión de 1mm, a partir del nodo en el que se tiene el máximo esfuerzo principal sobre el perfil del diente. Se mapea el campo de isopáquicas en esta zona, como se muestra en la Figura 18.

Tabla 7. Valores de máximo esfuerzo principal sobre los nodos en la punta de la grieta de 1 mm con carga aplicada sobre el círculo base

Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)	Nodo	σ_{max} (MPa)
111197	386,14	673	653,13	109390	431,50	152231	295,25
4	1771,7	675	492,59	109431	500,21	152232	355,59
109493	391,13	677	397,38	109430	730,10	152072	436,20
109392	414,93	679	323,28	671	1015,3	152233	494,76
109391	578,38	681	267,84				

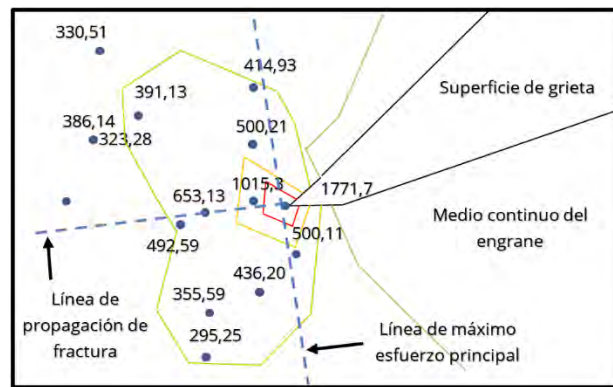


Figura 18. Localización de los nodos de la malla y nivel de esfuerzo al que están sujetos debido a la carga aplicada sobre el círculo de base del engrane

Es posible observar que, a partir del mapeo que se tiene de los nodos en la zona de la punta de la fractura, se puede graficar por color, la zona de máximos esfuerzos principales, lo que se muestra en la Figura 18. En la Figura 19 se observa que el campo de isopáquicas (esfuerzos principales máximos), está inclinado con respecto al plano de la fractura, esto indicaría que en la siguiente extensión de fractura se debe modificar y dirigir esta extensión de la grieta hacia lo mostrado por la inclinación del campo de isopáquicas [26, 27].

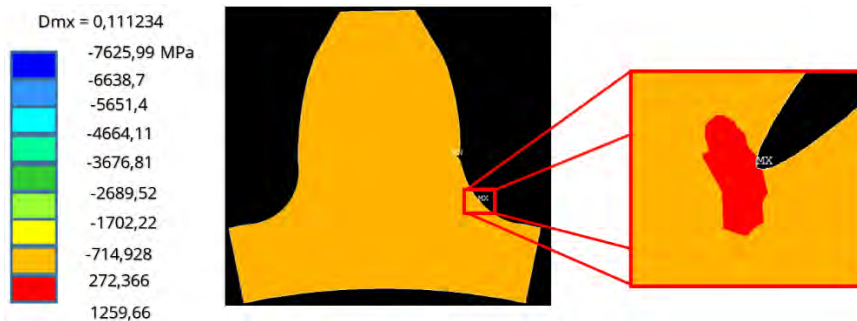


Figura 19. Campo de isopáquicas del engrane con fractura de 1 mm, obtenido cuando se aplica carga sobre el círculo base del diente del engrane

A continuación, en la Figura 20 se muestran los campos de isopáquicas para extensiones de grieta consecutivas directamente de 10 mm.

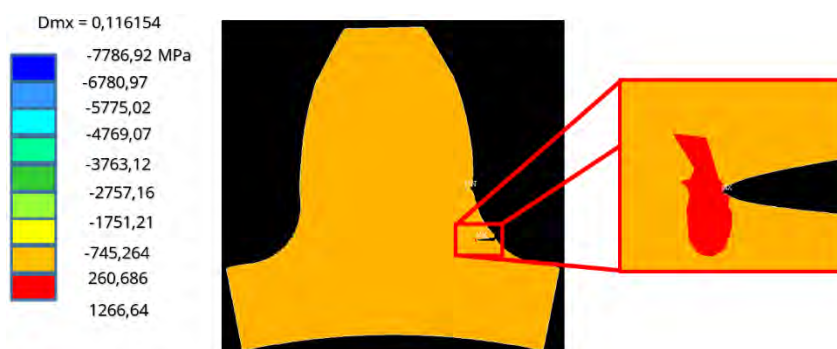


Figura 20. Grieta extendida a 10 mm de manera perpendicular a la línea de máximo esfuerzo principal

En la figuras anteriores fue posible observar los campos de isopáquicas para los casos en que inicialmente se tiene una fractura de 1 mm y a continuación, al corregir la dirección de propagación, haciendo que la extensión de la grieta tenga una dirección de propagación perpendicular al campo de máximos esfuerzos principales que pasan por la punta de la fractura, se plantea una extensión de un milímetro más, e inmediatamente se nota que, con la extensión en esta nueva dirección, el nuevo campo de isopáquicas en la punta de la grieta, queda virtualmente perpendicular a un eje de simetría que emana de la punta de la grieta. Posteriormente se corrieron nuevos casos con una dimensión para extensiones de grieta de 10 mm más. Se observa que el campo de isopáquicas para todos estos campos se conserva una forma virtualmente idéntica confirmando así que la dirección de propagación de fractura es a lo largo de esa línea.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De los tres casos descritos se puede ver claramente que el máximo *maximodum* se presenta para el punto de inicio de contacto ya que para el caso 1 se tienen un esfuerzo máximo principal de 2377,82 MPa, para el caso 2 se tiene de 1613,99 MPa y para el caso 3 7786,92 MPa, se tiene que obviamente, dado que el criterio de falla es el esfuerzo principal máximo igual a el esfuerzo último del material, este fallara al alcanzar el máximo nivel de esfuerzos, el cual se presenta precisamente para el caso 1.

A partir de esto podría afirmarse que no sería necesario efectuar los estudio 2 y 3. Sin embargo se decidió originalmente llevarlos a cabo estos estudios con el objetivo de confirmar que efectivamente si se proponen direcciones erróneas, los campos de esfuerzo efectivamente determinara la necesidad de modificar la dirección de propagación.

4. CONCLUSIONES

De los tres casos descritos se puede ver claramente que el máximo *maximodum* se presenta para el punto de inicio de contacto ya que para el caso 2 se tienen un esfuerzo máximo principal de 174,31MPa, para el caso 2 se tiene de 217,69 MPa y para el caso 151,91MPa, se tiene que, obviamente, dado que el criterio de falla es el esfuerzo principal máximo igual a el esfuerzo último del material, este fallara al alcanzar el máximo nivel de esfuerzos, el cual se presenta precisamente para el caso 2.

A partir de esto podría afirmarse que no sería necesario efectuar los estudio 1 y 3. Sin embargo se decidió originalmente llevarlos a cabo estos estudios con el objetivo de confirmar que efectivamente si se proponen direcciones erróneas, los campos de esfuerzo efectivamente determinara la necesidad de modificar la dirección de propagación.

Es visible en la ampliación del campo de esfuerzos mostrado en las Figuras 8, 13 y 18, que el campo de isopáquicas (máximos esfuerzos principales), es virtualmente perpendicular al plano de la fractura y que además muestra simetría de campo en las partes superior e inferior a dicho plano.

Es posible afirmar con base en lo antes expuesto que la dirección propuesta es la correcta y que indudablemente la fractura continuara extendiéndose según lo propuesto. Es importante destacar que este análisis se cumple exactamente si y solo si, las propiedades mecánicas del material cumplen con los requerimientos establecidos anteriormente los cuales son más conocidos como dogmas de la mecánica (linealidad, continuidad, homogeneidad e isotropía), ya que de lo contrario la grieta tenderá a desviarse hacia los puntos más débiles de la estructura del engrane como se muestra en la Figura 20.

REFERENCIAS

- [1] Cotterell B. (2002), The past, present, and future of fracture mechanics, *Engineering Fracture Mechanics* 69(5), 533-553.
- [2] Balankin A. (2000), *Mecánica de la fractura: Pasado, presente y futuro*. En 5to. Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. Ciudad de México.
- [3] Arana J. y González J. (2010). *Mecánica de Fractura*. Ed. Universidad del País Vasco.
- [4] Urriolagoitia G. (1970). The analysis of the stresses in gear wheels with novikov teeth using photoelastic and finite element method. Tesis de Maestría. University of Strathclyde.
- [5] Darle W. (1954). *Practical gear design*. McGraw-Hill.
- [6] Urriolagoitia G. (1976), *Directional Stability of cracks under biaxial stresses*. Disertación Doctoral. Universidad de Londres.
- [7] Urriolagoitia G. y Ortega J. (1992). *El método de elemento finito*. Ed. Instituto Politécnico Nacional.
- [8] Urriolagoitia G. (1965). *Proyecto de una máquina para soldar perfiles, fabricados a base de placas de acero*. Trabajo de grado. Instituto Politécnico Nacional.
- [9] Chacón R. et al. (2011). Programa de simulación para engranajes de dientes rectos por elementos finitos, *Revista Ciencia e Ingeniería* 32(3), 123-128.
- [10] Urriolagoitia G. (1996). *Aplicación de la mecánica de la fractura al caso de estructuras agrietadas sometidas a cargas de fatiga*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.

- [11] Romero B. (2009). Evaluación de la inducción de historia previa para el arresto de grietas sometidas a fatiga. Disertación Doctoral. Instituto Politécnico Nacional.
- [12] González J. (2004). Mecánica de Fractura. Ed. Limusa Noriega.
- [13] Romero B. (2009). Aplicación de multicargas para el arresto de grietas. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- [14] Chacón R. Et al. (2011). Programa de simulación para engranajes de dientes rectos por elementos finitos. Revista Ciencia e Ingeniería 32(3), 123-128.
- [15] Bedolla J. et al. (2013). Influencia de la fricción en el sif de un engrane. En XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM.
- [16] Molina A. (2014). Análisis del campo de esfuerzos residuales mediante el uso del método de respuesta de grieta. Disertación Doctoral. Instituto Politécnico Nacional.
- [17] Benítez L. (1985). Funcionamiento y análisis de fallas de los engranajes. En Terceras Jornadas Nacionales sobre Mantenimiento. Asociación Colombiana de Ingenieros.
- [18] Anglada M. (2006). Fractura de Materiales. Ed. J Alcalá.
- [19] James R. (1968). A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. Material Research Program 1, 379-386.
- [20] Pirard G. y Pirard C. (2007). Criterios de plasticidad o de fluencia criterio propio de un material. En Encuentro Nacional de Investigadores y Usuarios del Método de Elementos Finitos, Mecánica Computacional.
- [21] Ariza P. y Sáez A. (2004). Método de elementos finitos. Ed. Sevilla.
- [22] Bucci R. et al. (1972). integral estimation procedures, Fracture Toughness; Part II. American Society for Testing and Materials International.
- [23] Hernández E. y Espejo E. (2002). Mecánica de fractura y análisis de falla. Ed. El Malpensante.
- [24] James R. (1968). A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. Material Research Program 1, 379-386.
- [25] Knauss W. (1970). Delayed failure-the Griffith problem for linearly viscoelastic materials. International Journal of Fracture Mechanics 20, 7-20.
- [26] Gold V. et al. (2008). A model for fracture of explosively driven metal shells. Engineering Fracture Mechanics 75(2), 275-289.
- [27] Hernández L. et al. (2009). Assessment of the structural integrity of cracked cylindrical geometries applying the EVTUBAG program. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería 32(3), 190-199.

ColombiaClass: Sistema de clasificación para la gestión de activos de construcción en Colombia

Juan Carlos Gómez Roldán¹
Guillermo Mejía Aguilar²
Universidad Industrial de Santander
Colombia

Investigaciones publicadas en diversos reportes por el Foro Económico Mundial dejan clara la relevancia del desarrollo de la infraestructura y la adopción de tecnologías de la información y las comunicaciones, como pilares fundamentales y entornos habilitantes para el incremento de la productividad y el mejoramiento de la calidad de vida de una nación. Asimismo, destacan el potencial de la metodología Building Information Modeling BIM como proceso indispensable para la gestión y transformación de los entornos urbanos, haciendo óptimos y más eficientes los modelos de servicios, la gobernanza y la planificación. En este contexto, el gobierno de Colombia ha formulado múltiples iniciativas y leyes, entre las que se destacan la directiva de transformación digital nacional y la estrategia nacional BIM 2020 - 2016, caracterizadas por la necesidad de normalizar el sector por medio de estándares internacionales como el ISO 19650, y de sistemas de clasificación que permitan estandarizar la gestión de los activos de construcción durante todo su ciclo de vida. En este capítulo se define un sistema de clasificación mediante un enfoque de investigación constructiva, en el que se utilizaron cuatro elementos: 1) revisión de la literatura, 2) encuesta nacional a especialistas, 3) talleres Delphi con especialistas nacionales, y 4) publicación y divulgación del sistema. Como resultado de esta investigación se definió un sistema de clasificación para la gestión de activos de construcción ajustado a la industria colombiana, denominado ColombiaClass. La investigación también incluye análisis y conclusiones para la óptima operación y mantenimiento del sistema, y para el desarrollo de futuras investigaciones y trabajos que permitan incrementar su cobertura, mejoramiento continuo, e importancia táctica en la gestión de los activos de construcción a nivel nacional.

¹ Ingeniero Civil y Especialista en Alta gerencia.

Contacto: juan.gomez@colombiaclass.org

² Ingeniero Civil.

Contacto: gmejia@uis.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En su informe de competitividad global de 2019, el Foro Económico Mundial FEM señala que, el desarrollo de la infraestructura y la adopción de tecnologías de la información y las comunicaciones TIC, son dos de los doce pilares fundamentales y entornos habilitantes para el incremento de la competitividad y el mejoramiento de la calidad de vida de una nación [1]. Asimismo, el FEM en su informe de ciudades gemelas digitales de 2022, resalta el potencial de la metodología Building Information Modeling BIM, como proceso indispensable para la gestión y transformación de los entornos urbanos, ya que permite optimizar los modelos de servicios, la gobernanza y la planificación. Explica que, junto con la adopción de políticas y estándares adecuados, BIM impulsa una producción y operación urbana más intensiva y eficiente; espacios urbanos habitables y convenientes; y un entorno acorde con los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS de la Organización de las Naciones Unidas ONU.

También indica que, la metodología BIM disminuye la complejidad e incertidumbre en la planificación, el diseño, la construcción y la operación de la infraestructura, mediante su simulación, seguimiento, diagnóstico, predicción y control; y mediante la operación simultánea y la interacción entre las dimensiones física y digital de los entornos urbanos [2].

Entre tanto, la Cámara Colombiana de la Construcción CAMACOL, en su informe sobre productividad y riesgos en el sector de la construcción de 2018, hace un llamado a las instituciones públicas y privadas a formular e implementar medidas para mitigar la baja productividad del sector en el país, la cual presenta uno de los niveles históricos más bajos respecto de sus pares internacionales [3]. Durante más de 20 años, la productividad en la construcción colombiana se ha contraído a tal punto de llevar al país a la categoría de naciones rezagadas, con un decrecimiento del -0.5% anual [4].

Los números preocupan, ya que este sector tuvo en 2018 una participación del 8,1% del producto interno bruto PIB nacional, el cual totalizó COP\$74,5 billones [5]. Se atribuyen estos resultados, entre otras variables, a una industria sin estandarización y al bajo nivel de transformación digital, lo que ha llevado a generar alta variabilidad e incertidumbre en los proyectos de construcción. Asimismo, identifica la necesidad de estandarizar las normas vigentes y fortalecer la interoperabilidad entre las diferentes agendas de desarrollo nacional [3, 6].

En este contexto, el gobierno de Colombia inicia en 2019 el proceso de transformación digital nacional, en el cual incluye al sector de infraestructura. El propósito central de este trabajo consiste en aumentar la competitividad del país por medio del incremento de la productividad y la interoperabilidad entre todos los interesados del sector, el cual representa un porcentaje cada vez mayor del PIB de la nación, y es una fuente que promueve la generación de empleo y desarrollo en todas las escalas de la economía [7].

Adicionalmente, formula la estrategia nacional BIM y establece un plazo a 2026 para que el sector gestione el 100% de sus proyectos cumpliendo con este requisito. Para llevar a cabo este proceso, identifica la necesidad de un sistema de estandarización que ayude a reducir la fragmentación que enfrenta actualmente el sector, permitiendo de manera progresiva la migración de todas las organizaciones e instituciones a un modelo interconectado de gestión integral y toma de decisiones basadas en datos. Se espera que esta normalización incremente la eficiencia, la productividad y la articulación entre los distintos actores de la cadena de valor de la construcción [8].

Por su parte, el sector ha tomado como guía para esta implementación, lo establecido por la Organización Internacional de Normalización ISO, en el estándar ISO 19650: Organización y digitalización de la información en obras de edificación e ingeniería civil que utilizan BIM, en el cual se establece la necesidad de un sistema de clasificación para gestionar la información en todas las fases de los activos [9-11].

Como aporte a esta estrategia nacional, esta investigación ha definido un sistema de clasificación para la gestión de activos de construcción ajustado a la industria colombiana, denominado ColombiaClass. Este sistema permite estructurar, clasificar y codificar la información de todo el ciclo de vida de un activo de construcción, con un lenguaje único y estandarizado de comunicación que sirve a todos los interesados.

Está conformado por 23 tablas de diferentes temáticas o facetas diseñadas para apoyar una gestión integral de los activos, acorde con la metodología BIM, y compatible con el sistema de compra pública nacional de Colombia Compra Eficiente [12].

ColombiaClass está basado principalmente en lo dispuesto en los estándares ISO 12006: Construcción de edificios. Organización de la información sobre obras de construcción [13, 14], ISO 81346: Sistemas, instalaciones, equipos y productos industriales. Principios de estructuración y designación de referencia [15-17]; e ISO 22274: Sistemas de gestión de terminología, conocimiento y contenido - Aspectos conceptuales para el desarrollo e internacionalización de sistemas de clasificación [18]; así como en las demás leyes, estándares y metodologías relacionadas en el presente documento.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Transformación digital

El Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones del Gobierno de Colombia Mintic describe la Transformación digital como, el uso y apropiación de las tecnologías de información combinadas con la capacidad de liderazgo y el cambio organizacional para mejorar o cambiar radicalmente el desempeño y el modelo de negocio de las empresas [19]. En este contexto, se enmarcan múltiples leyes y normas del gobierno de Colombia que buscan llevar al país hacia el incremento de la competitividad e interoperabilidad entre instituciones y organizaciones. En este ejercicio se ha hecho evidente la necesidad de estandarizar diversos elementos que permitan un lenguaje común entre los interesados, punto en el cual se ubica el aporte de la presente investigación.

2.2 Estructuras desagregadas de trabajo

Como primer elemento de estandarización en la búsqueda de la interoperabilidad entre los interesados en el sector, se encuentran las Estructuras Desagregadas de Trabajo EDT. De acuerdo con [20], una EDT es una descomposición del alcance definido de un programa o proyecto en niveles progresivamente más bajos que consisten en elementos de trabajo.

Esta estructura debe proporcionar un marco lógico para descomponer el 100% del trabajo definido en el alcance del proyecto. Cada nivel descendente de una EDT proporciona una definición más detallada del trabajo. Este trabajo puede estar orientado al producto, a la entrega o a los resultados; y, adicionalmente, puede estar enfocado en fases, disciplinas o ubicaciones de programas o proyectos. El propósito de esta clasificación o desagregación tiene como fin mejorar y respaldar la gestión de los activos, al permitir una planificación, ejecución, monitoreo y control mediante elementos más pequeños.

En la actualidad, la mayoría de las EDT tienen una descomposición jerárquica, es decir, que cada nivel de descomposición contiene el 100% de los elementos de su nivel inmediatamente superior (subordinación sucesiva). La ISO 21511 se basa únicamente en este tipo de EDT, y denomina estas relaciones como *padre - hijo*. Profundizando en estos conceptos, se da cabida a una metodología de clasificación adicional denominada Sistemas de Clasificación, la cual se presenta a continuación.

2.3 Sistemas de clasificación

De acuerdo con [21], un sistema de clasificación SC es un método que permite la distribución de un conjunto de entidades coordinadas, organizadas y jerárquicas, posibilitando la identificación de los componentes de una estructura. Estas entidades son objetos físicos o intangibles que se utilizan en el diseño, la construcción, la operación y la deconstrucción de un activo. Por su parte, [18] define un SC como una colección sistemática de clases y objetos que comparten las mismas características, organizada de acuerdo con un conjunto conocido de reglas, en la que los objetos pueden agruparse.

Otra definición relevante indica que, los SC son estructuras de clasificación estandarizada que integran en fases ordenadas la información de entregables de todo el ciclo de vida de los activos de la construcción [22].

Similar a un conjunto estandarizado de estructuras desagregadas de diferentes temáticas o facetas, que contienen elementos codificados, los SC organizan el contenido de forma sistemática, con algunos aportes estructurales que se verán a continuación.

La clasificación de los elementos de un SC se organiza agrupando objetos que tienen características o cualidades similares, como los espacios arquitectónicos o los productos de un proyecto. También es posible una estructuración por dominios, que corresponden a los aspectos relevantes y de interés administrativo y legal, como la localización geográfica, el uso de la edificación, las disciplinas, o las fases del activo, entre otros. A cada nodo de esta matriz se le asocia una codificación, la cual sirve para referenciar toda la información contenida en los modelos BIM y otras herramientas digitales.

Estos códigos o notación alfanumérica definen e identifican de forma única cada elemento e información que componen dicho modelo digital, estructurándolo y permitiendo su lectura por humanos y por máquinas [23].

2.4 Building Information Modeling

El gobierno de Colombia ha adoptado la definición de Building Information Modeling BIM como, un proceso colaborativo a través del cual se crea, se comparte y se usa información estandarizada en un entorno digital, durante todo el ciclo de vida de un proyecto de construcción [24]. [25] define BIM como, el uso de una representación digital compartida de un activo construido, para facilitar los procesos de diseño, construcción y operación, y para proporcionar una base confiable para la toma de decisiones.

La utilidad de la metodología BIM radica en que cada objeto que hace parte de un modelo digital contiene datos y relaciones asociadas con información sobre múltiples atributos como: valor, especificaciones técnicas, datos del fabricante, dimensiones, requisitos técnicos y administrativos, entre otros. Estos datos se pueden extraer para tomar decisiones de acuerdo con las necesidades de cada interesado, ejecutando simulaciones para determinar comportamientos y modelando todo el ciclo de vida del activo. Esto se logra compartiendo un único modelo de información virtual actualizada común [23].

El Departamento Nacional de Planeación DNP identifica que la adopción de la metodología BIM permitirá una reducción de la variabilidad y un aumento en la productividad del sector de infraestructura y construcción nacional [24]. De acuerdo con lo dispuesto en [9] se requiere un SC para:

- Establecer las normas de información del proyecto, y designar los medios disponibles para estructurar y clasificar la información.
- Establecer un Entorno Común de Datos CDE que permita clasificar cada contenedor de información, de acuerdo con lo definido en [13].

[10] establece que se requiere un SC para:

- Identificar los activos a los que la gestión de la información puede producir un beneficio neto, y asignarles una estructura de clasificación.
- Establecer las normas de información de los activos y designar los medios disponibles para estructurar y clasificar la información de acuerdo con lo definido en [13].
- Establecer un CDE que permita clasificar cada contenedor de información, de acuerdo con lo definido en [13].

2.5 Contexto y ubicación del aporte de la investigación

Tomando como punto de partida lo expuesto por [26] y [27] en el marco de la gestión de proyectos, se contextualiza e ilustra el punto de inserción del producto de la presente investigación. La Figura 1 ilustra este punto. La figura anterior presenta: 1. La política pública, la cual consiste en el conjunto de normas y

leyes públicas que habilitan y enmarcan las estrategias de inversión, 2. La estrategia, constituida por los estándares que definen qué se debe hacer con el activo (para incrementar su valor), 3. La táctica, representada en las metodologías o conjunto de procesos que definen cómo se debe transformar dicho activo, y por último 4. La ejecución, la cual consiste en la fase de desarrollo (ejecución de la obra civil) y la fase de operación y mantenimiento del activo, de acuerdo con los parámetros anteriormente definidos [27].

Estos cuatro aspectos se monitorean y controlan continuamente en todo el ciclo de vida de un activo, con el fin de realizar mejoras y ajustes constantes.

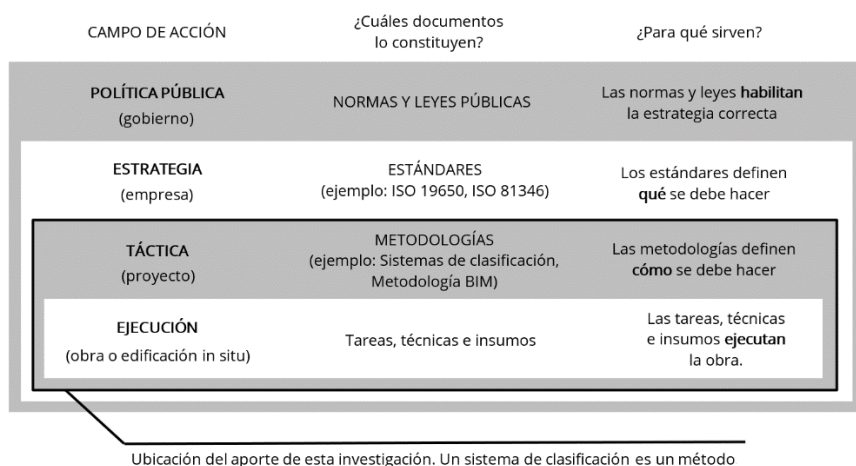


Figura 1. Contexto y ubicación del aporte de la investigación

Nótese que cada uno de los campos de acción definidos enmarca o contiene a los que están debajo de este. En este orden, una norma o ley contiene estándares; estos a su vez contienen metodologías; y estas últimas contienen tareas, técnicas e insumos. El entendimiento de estos aspectos es de vital importancia para dar contexto a los elementos como estándares y sistemas de clasificación de los cuales se hablará en este documento. Dicho esto, el sistema de clasificación producto de esta investigación se localiza en la táctica, es decir, es un método para la gestión de los activos de construcción, que está articulado con BIM.

3. MÉTODO

La metodología utilizada para definir este sistema de clasificación fue Constructive Research Approach EIC, una metodología de investigación que se enfoca en construir soluciones a problemas del mundo real a partir de la integración entre la teoría y la práctica o experiencia, haciendo un aporte al campo disciplinar. Todos los artefactos humanos, tales como modelos, diagramas, planos, estructuras organizativas, productos comerciales y sistemas de información, son construcciones.

Se caracterizan porque se inventan y desarrollan, no se descubren [28]. Su objetivo es identificar y resolver problemas prácticos reales. De acuerdo con [29], el EIC es potencialmente útil para el desarrollo de soluciones en la industria de la construcción debido a su habilidad para conducir a mejores prácticas de gestión, procesos más efectivos y al incremento de la productividad.

Para el desarrollo del método se utilizaron cuatro elementos: 1) revisión de la literatura, 2) encuesta nacional a especialistas, 39 talleres Delphi con especialistas nacionales, y 4) publicación y divulgación del sistema.

3.1 Revisión de la literatura

Se realizó una revisión de literatura basada en una metodología adaptada al modelo de [30], elaborada por el Grupo de investigación en gestión y modelado de la construcción de la Universidad Industrial de Santander. La Figura 2 ilustra la metodología.

Con el fin de consolidar la información requerida, la revisión de literatura se realizó siguiendo dos enfoques y los criterios presentados en la Tabla 1.

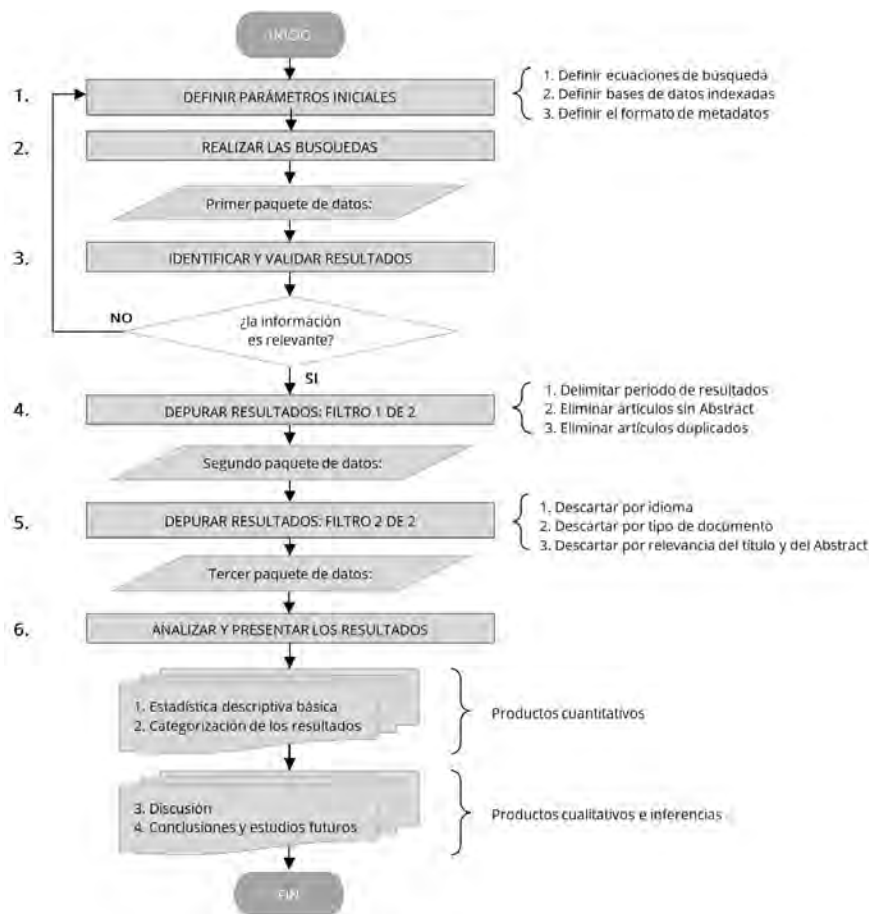


Figura 2. Flujograma de la metodología utilizada para la revisión de la literatura

Tabla 1. Criterios utilizados para la revisión de literatura

Criterio	Revisión 1 de 2	Revisión 2 de 2
Fecha de revisión	Periodo comprendido entre el 2020/03/15 y 2022/02/28	2022/02/11
Enfoques de revisión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relación entre los SC y la gestión del alcance ▪ Relación entre los SC y la gestión de las adquisiciones ▪ Temáticas de investigación en SC ▪ Tipos de SC ▪ Principales SC y estándares de la construcción 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relación entre los SC y BIM ▪ Tendencias de investigación en SC ▪ Principales SC y estándares de la construcción
Ecuaciones de búsqueda	"classification system" AND ("construction" OR "building") AND "procurement" "classification system" AND ("construction" OR "building") AND "scope management" "classification system" AND ("construction" OR "building") AND "standardization" "classification system" AND "procurement management" AND "standardization" "classification system" AND "scope management" AND "standardization" "classification system" AND ("work breakdown structure" OR "WBS") "gestion del alcance" AND "contratos" "gestion de las adquisiciones"	"classification system" AND ("BIM" OR "BUILDING INFORMATION MODELING") AND "CONSTRUCTION" AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "BUSI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "DECI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ECON")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cr")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))
Bases de datos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Scopus ▪ American Society of Civil Engineers (ASCE) ▪ Google Scholar ▪ Publindex ▪ Repositorio de la Universidad Industrial de Santander ▪ Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia ▪ Repositorio de la Universidad de los Andes ▪ Sitios web de los sistemas de clasificación 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Scopus
Periodo búsqueda	1922 a 2022	2000 a 2022
Idiomas	Inglés, español, francés, alemán, italiano, danés, sueco, coreano, mandarín y otras lenguas asiáticas	Inglés

Tipos de documentos seleccionados	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Artículos científicos ▪ Capítulos de libros ▪ Estándares ▪ Libros ▪ Patentes ▪ Reportes de organizaciones ▪ Sistemas de clasificación ▪ Tesis doctorales y de maestría 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Artículos científicos ▪ Conference Paper ▪ Conference Review ▪ Revisiones (Reviews) 	
	Análisis de datos	Manual	RStudio 2021.09.2 Build 382 (Bibliometrix), manual
Resultados relevantes	302	241	

Al realizar la depuración de elementos duplicados e integración de las fuentes se obtuvo un total de 522 resultados relevantes. La presentación y la discusión de los resultados se encuentra en los siguientes capítulos de este documento.

3.2 Encuesta nacional a especialistas

La estructura que se siguió para el desarrollo de la encuesta corresponde a la metodología adaptada del modelo de [31], que se ilustra en la Figura 3, la Tabla 2 presenta los criterios utilizados en el desarrollo de la encuesta y la Tabla 3 describe la estructura del cuestionario de preguntas realizadas.

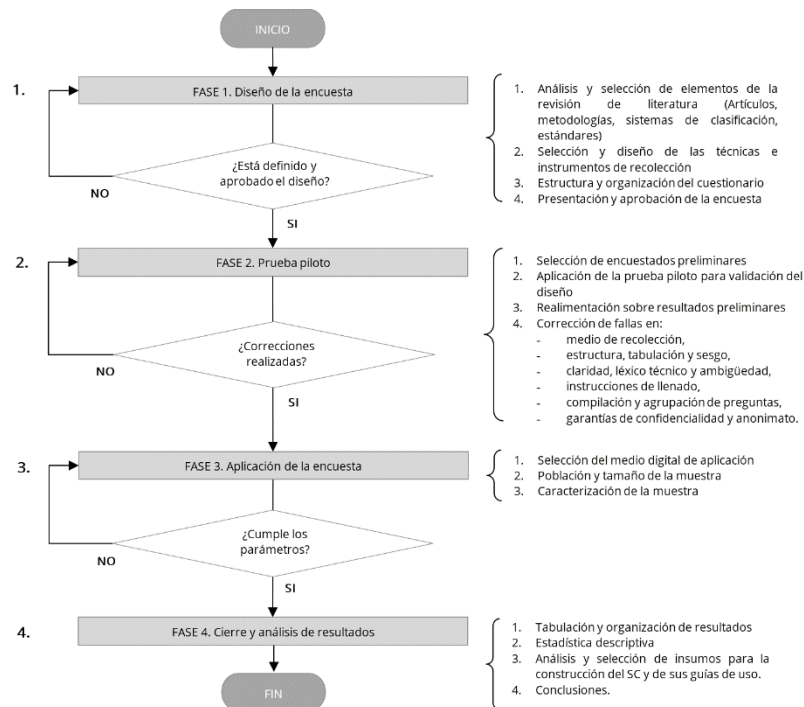


Figura 3. Flujograma de la metodología utilizada para la encuesta nacional a especialistas

Tabla 2. Criterios utilizados para la encuesta nacional a especialistas

Criterio	Valores
Técnica	Encuesta
Instrumento de recolección	Cuestionario digital
Herramienta digital	Google formularios
Medio de difusión	Correo electrónico
Organizaciones, instituciones y personas invitadas a participar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 49 sociedades de ingeniería y arquitectura a nivel nacional ▪ 3 universidades nacionales ▪ 40 profesionales destacados por su experiencia a nivel nacional
Secciones de la encuesta	Tres (3)
Cantidad total de preguntas	Treinta y seis (36)
Tiempo estimado de respuesta	20 minutos
Tipos de preguntas	Selección múltiple, escala Likert, respuesta única.
Grupo para prueba piloto	18 estudiantes y 2 profesores de la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS
Población objetivo de la encuesta	Con experiencia en la gestión de proyectos residenciales nivel nacional

Tamaño de la muestra representativa requerido	66 respuestas
Porcentaje de confiabilidad	95%
Tamaño final de la muestra	160 respuestas
Periodo de la encuesta (aaaa/mm/dd)	Del 2022/04/07 al 2022/05/12

Tabla 3. Estructura del cuestionario de preguntas de la encuesta nacional

Sección	Temática	Preguntas	Cantidad	% total
1	Instrucciones de llenado e información preliminar	ninguna	0	0%
2	Estándares de gestión	1 a 3	3	8%
2	Estructuras Desagregadas de Trabajo EDT	4 a 11	8	22%
2	Sistemas de Clasificación SC	12 a 14	3	8%
2	Building Information Modeling BIM	15 a 20	6	17%
2	Matriz de Madurez BIM	21 a 29	9	25%
3	Perfil profesional y de la organización del encuestado	30 a 36	7	19%
Total			36	100%

3.3 Talleres Delphi con especialistas nacionales

Como lo describe [32], el método Delphi es un enfoque de comunicación estructurada entre un grupo de especialistas, cuyo objetivo es la construcción de consenso sobre un problema complejo, el cual se logra por medio de un proceso iterativo de rondas de talleres de realimentación de su opinión y juicio. Una vez analizados los resultados de la primera ronda, se dan a conocer a los especialistas y se procede a realizar nuevas rondas que van creando el consenso del constructo objetivo. Para el diseño de los talleres Delphi se tomaron como referencia los 22 documentos que se presentan en la Tabla 4, ordenados por tipo de documento y autor/organización.

Tabla 4. Referencias para el diseño y aplicación de las encuestas Delphi

Ítem	Autor/Organización	Año	Título	Tipo
1	Ameyaw, E. et al.	2016	Application of Delphi method in construction engineering and management research: a quantitative perspective	Artículo
2	Kassem, M. et al.	2013	A proposed approach to comparing the BIM maturity of countries	Artículo
3	Succar, B. et al.	2013	An integrated approach to BIM competency assessment, acquisition, and application	Artículo
4	BIMe Initiative	2016	Matriz de madurez BIM v 1.22	Artículo
5	BIMe Initiative	2009	The five components of BIM performance measurement	Artículo
6	buildingSMART/ISO	2021	ISO 29481: Manual de Entrega de Información (IDM) de buildingSMART	Estándar
7	ISO	2020	ISO 16757: Estructura y modelo de datos para catálogos BIM de construcción	Estándar
8	ISO	2020	ISO 23386: BIM y otros procesos digitales en construcción - Metodología para describir, crear y mantener propiedades en diccionarios de datos interconectados	Estándar
9	ISO	2020	ISO 23387: Plantillas de datos para objetos de construcción - Conceptos y principios	Estándar
10	ISO	2019	ISO 81346-2: Principios de estructuración y designaciones de referencia - Parte 2: Clasificación de objetos y códigos para clases	Estándar
11	ISO	2018	ISO 19650: Gestión de la información en BIM	Estándar
12	ISO	2018	ISO 21511: Estructura Desagregada de Trabajo (EDT) para la gestión de programas y proyectos	Estándar
13	ISO	2018	ISO 22274: Aspectos conceptuales para el desarrollo e internacionalización de sistemas de clasificación	Estándar
14	ISO	2018	ISO 81346-12: Principios de estructuración y designaciones de referencia - Parte 12: Obras de construcción y servicios de construcción	Estándar
15	ISO	2014	ISO 55000: Gestión de activos: descripción general, principios y terminología	Estándar
16	Blanco, C.	2011	Encuesta y estadística - Métodos de investigación cuantitativa en ciencias sociales y comunicación	Libro
17	Camacol	2020	Guía para la Adopción BIM en las Organizaciones	Reporte
18	BIM Colombia	2020	Guía de Aplicación BIM	Reporte
19	BIM Colombia	2020	Guía de Estándares, Métodos y Procedimientos BIM	Reporte
20	Mintic	2019	Modelo de madurez para la transformación digital	Reporte
21	PlanBIM	2019	Estándar BIM para Proyectos Públicos de Chile	Reporte
22	Succar, B.	2013	BIM: Conceptual constructs and performance improvement tools	Tesis doctoral/maestría

Estos talleres consistieron en un total de 26 actividades distribuidas en 7 bloques de trabajo, realizados de acuerdo con la metodología adaptada de [32] (Figura 4).

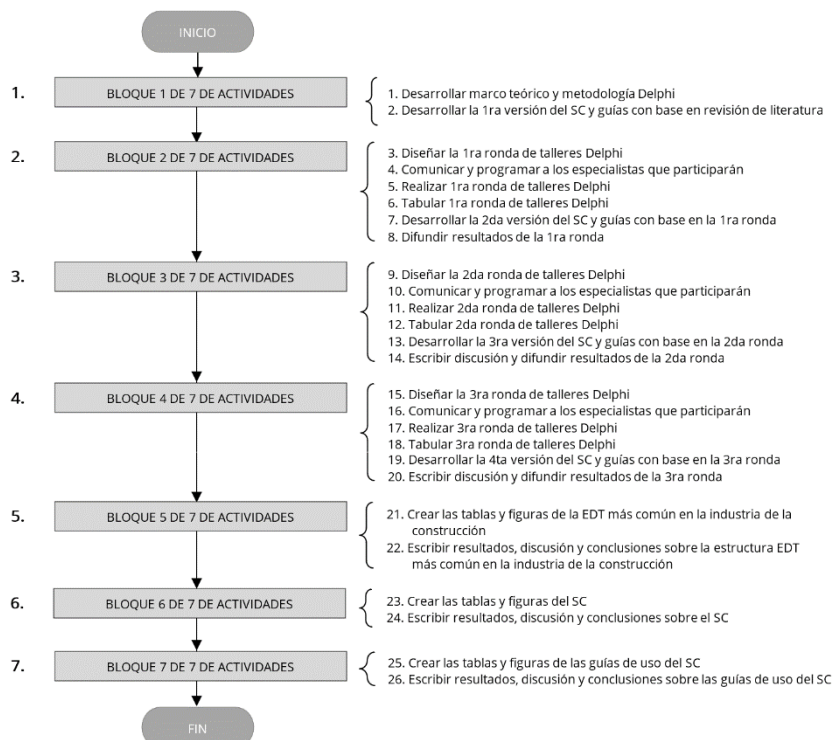


Figura 4. Flujograma de la metodología utilizada para los talleres Delphi

3.4 Estrategia inicial para la publicación y divulgación del sistema de clasificación

Como estrategia inicial para la publicación y divulgación del sistema de clasificación se han planeado y diseñado 6 medios, cada uno con el contenido del sistema, guías de uso, referencias y datos de contacto: 1) sitio web, 2) presentación en congreso internacional, 3) publicación en documento del congreso, 4) estructuración en las bases de datos, 5) archivo de hojas de cálculo, y 6) archivo portable pdf.

En este orden, el presente documento contiene, además, los análisis y las conclusiones para la óptima operación y mantenimiento del sistema, y para el desarrollo de futuras investigaciones y trabajos que permitan incrementar su cobertura, su mejoramiento continuo, e importancia táctica en la gestión de los activos de construcción a nivel nacional.

El diseño, desarrollo, configuración y puesta en marcha de este sitio web (www.colombiaclass.org) se realizó como parte del producto final de esta investigación. Esta parte del trabajo incluye el diseño gráfico y de imagen corporativa, la compra del dominio, hospedaje (hosting), autenticación de identidad y conexión cifrada mediante certificado digital SSL, y cuentas de correo electrónico organizacionales con el sufijo @colombiaclass.org.

Siguiendo la estrategia de múltiples países alrededor del mundo que cuentan con amplia experiencia en el desarrollo e implementación de sistemas de clasificación para el sector de la construcción, el comité de ColombiaClass ha decidido donar este trabajo al país; por tanto, el sistema de clasificación ColombiaClass es gratuito, y de libre distribución y uso.

Con el fin de promover el cuidado del medio ambiente y el proceso de transformación digital nacional, se recomienda el uso de ColombiaClass en formato digital. Todo el contenido del sistema se encuentra disponible para consulta en los siguientes tres formatos: 1) sitio web (extensión .html), 2) hoja de cálculo (extensión .xlsx), y 3) archivo portable (extensión .pdf). Este puede visualizarse desde cualquier dispositivo y programa del mercado, sin embargo, el estándar utilizado para la configuración visual óptima corresponde a una resolución de pantalla de 1920 x 1080 pixeles (1080p).

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Estructura general del sistema de clasificación

ColombiaClass ha sido desarrollado para apoyar la gestión integral de activos / proyectos de construcción en todas las áreas de conocimiento a saber: Gestión del alcance, de los contratos, del tiempo, del costo, de los riesgos, de la calidad, de los recursos, de la integración, de las comunicaciones, de los interesados, de HSSE, financiera, marketing, legal, de los datos, de la innovación, y del cambio, entre otros [26, 27, 33-36].

La Figura 5 ilustra las 23 tablas del sistema, ordenadas en 5 grupos. Cada tabla está identificada con una letra (A, B, C, etc.), su faceta o temática, y con un color representativo del grupo al cual pertenece. En el esquema también es posible ver la estructura organizacional de Empresa, Portafolios, Programas y Proyectos, que describe [26], junto con los Contratos. Este último con el fin de dar un apoyo adicional a la gestión de los contratos y otras adquisiciones que se detalla en las guías de uso de las tablas correspondientes.

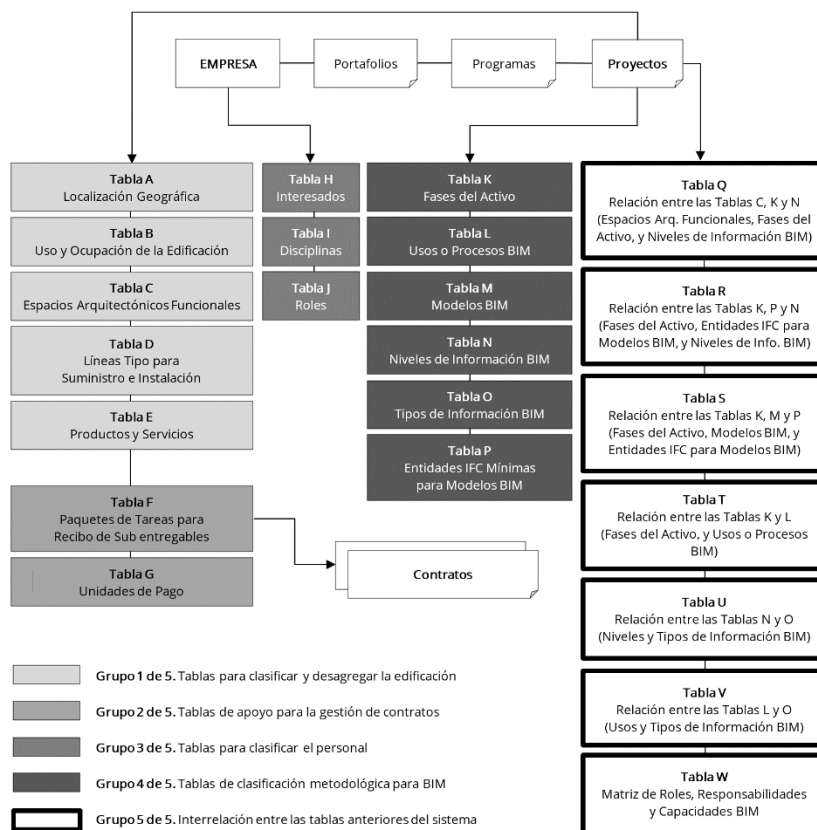


Figura 5. Estructura general de ColombiaClass

4.2 Grupos de tablas del sistema de clasificación

- Grupo 1.** Tablas para clasificar y desagregar la edificación (A, B, C, D, E). Conjunto principal de tablas del sistema de clasificación. Está compuesto por 5 tablas que contienen las temáticas y elementos necesarios para clasificar todos los insumos - tangibles e intangibles - requeridos para generar el producto físico final que se espera obtener en cada fase de un activo de construcción. Se debe clasificar teniendo como referencia y objetivo la edificación completa que se desea construir. Este requisito permite centrar el ejercicio de clasificación en la gestión del alcance [26]. Este alcance debe mantenerse constante durante todas las fases del activo. Cada tabla contiene una temática particular de clasificación, cuyos elementos están organizados jerárquicamente y permiten desagregar, clasificar y codificar detalladamente el alcance por localización, por función, por tipo, y por producto, de acuerdo con lo establecido en [15-17]:
 - En la tabla A el activo se clasifica *por localización*
 - En la tabla B el activo se clasifica *por función*

- En la tabla C se comienza a dividir o desagregar la edificación en partes *por función*
- En la tabla D se continúa desagregando estas partes funcionales *por tipo*

En la tabla E se finaliza la desagregación anterior *por producto*. Esta tabla corresponde a la clasificación de productos y servicios de la ONU, utilizada por el sistema nacional de Colombia Compra Eficiente [37]. En las tablas A y B no se realiza una desagregación o división física del activo en partes. Esto ocurre a partir de la tabla C en adelante. El grupo 1 de tablas permite una ordenación que apoya la gestión integral de todas las áreas de conocimiento descritas anteriormente, y su uso en la implementación de la metodología BIM.

- *Grupo 2.* Tablas de apoyo para la gestión de contratos (F, G). Conjunto de 2 tablas especialmente dedicadas a ser un complemento al Grupo 1, en la estructuración y gestión de contratos y otras adquisiciones, de acuerdo con lo establecido en [13]. El grupo 2 se requiere particularmente para la gestión de contratos. Debido a esto, su alcance enmarca las áreas conocidas como restricciones contrapuestas, a saber: Gestión del alcance, del tiempo, del costo, de la calidad, de los recursos y del riesgo [26].
- *Grupo 3.* Tablas para clasificar el personal (H, I, J). Conjunto de 3 tablas que permiten la clasificación de todos los interesados en un activo, incluyendo sus disciplinas y roles. Sirve de guía a la empresa u organización para la estructuración y la gestión del personal involucrado durante todo el ciclo de vida del activo. En la tabla J - Roles, es posible encontrar los Roles BIM junto con sus responsabilidades y competencias, según lo dispuesto por [38].
- *Grupo 4.* Tablas de clasificación metodológica para BIM (K, L, M, N, O, P). Conjunto de 6 tablas destinadas al cumplimiento de otras facetas de ordenación y clasificación de la información para BIM y la gestión de activos de construcción. Establece parámetros de estandarización como las 9 fases de un activo, los 25 usos BIM, los 9 modelos BIM, los 6 niveles de información BIM, los 15 tipos de información BIM, y las 26 entidades IFC mínimas para modelos BIM, de acuerdo con lo establecido en múltiples estándares y metodologías internacionales relacionadas en la guía de uso de cada tabla.
- *Grupo 5.* Interrelación entre las tablas anteriores (Q, R, S, T, U, V, W). Conjunto de 7 tablas de apoyo. Ilustran la interrelación y los parámetros para el uso correcto de múltiples facetas presentadas en las anteriores tablas del sistema de clasificación, en el marco de los estándares y las metodologías nacionales e internacionales referenciadas, y del desarrollo realizado por el comité de ColombiaClass.

Se aclara que, es posible utilizar cualquiera de las tablas de manera individual o en articulación con las demás tablas del grupo al cual pertenece, y del sistema en general. Asimismo, se entiende que en el proceso de implementación de ColombiaClass, cada interesado define cuáles tablas utiliza y hasta qué nivel de desagregación realiza la clasificación del activo / proyecto, de acuerdo con sus necesidades y expectativas [26]. Sin embargo, se recomienda utilizar cada tabla en conjunto con las demás tablas del sistema, y clasificar hasta los últimos niveles de cada una, ya que de esta manera se habilita la posibilidad de coleccionar, almacenar y analizar metadatos más específicos, lo que resulta útil para la toma de decisiones en la gestión del activo [25].

Por tanto, es altamente recomendable atender a la siguiente guía de uso de las tablas para clasificar y disgregar la información de un activo / proyecto según lo establecido en el [9, 10], en entidades coordinadas, organizadas y estandarizadas, que permitan su gestión eficiente y la correcta implementación de la metodología BIM y sus modelos 3D:

- Para la gestión de contratos y otras adquisiciones: Utilizar todas las tablas de los grupos 1, 2 y 3.
- Para una gestión integral de los activos / proyectos, y para el uso en el marco de la metodología BIM: Utilizar todas las tablas de los grupos 1, 3, 4 y 5. El grupo 2 se requiere particularmente para la gestión de contratos. En consecuencia, su alcance enmarca las áreas conocidas como restricciones contrapuestas, a saber: Gestión del alcance, del tiempo, del costo, de la calidad, de los recursos y del riesgo [26].

A pesar de lo anterior, es entendible que una empresa u organización realice una implementación progresiva de las leyes, los estándares y las metodologías - incluido ColombiaClass -, por tal motivo, se recomienda la asesoría de especialistas para su correcta estructuración y desarrollo. Para ampliar la información por favor consultar la guía detalla de uso en: <https://colombiaclass.org/detallada.html>

4.3 Guías de uso del sistema de clasificación

El sistema de clasificación cuenta con 3 guías de uso: 1. Una infografía básica preliminar, 2. Una guía rápida, y 3. Una guía detallada de uso del sistema y de cada tabla.

- *Infografía básica preliminar.* Como punto de partida de las guías de uso, la Figura 6 presenta de manera introductoria qué es, para qué sirve, y cómo funciona ColombiaClass, con el fin de dar un panorama general del sistema

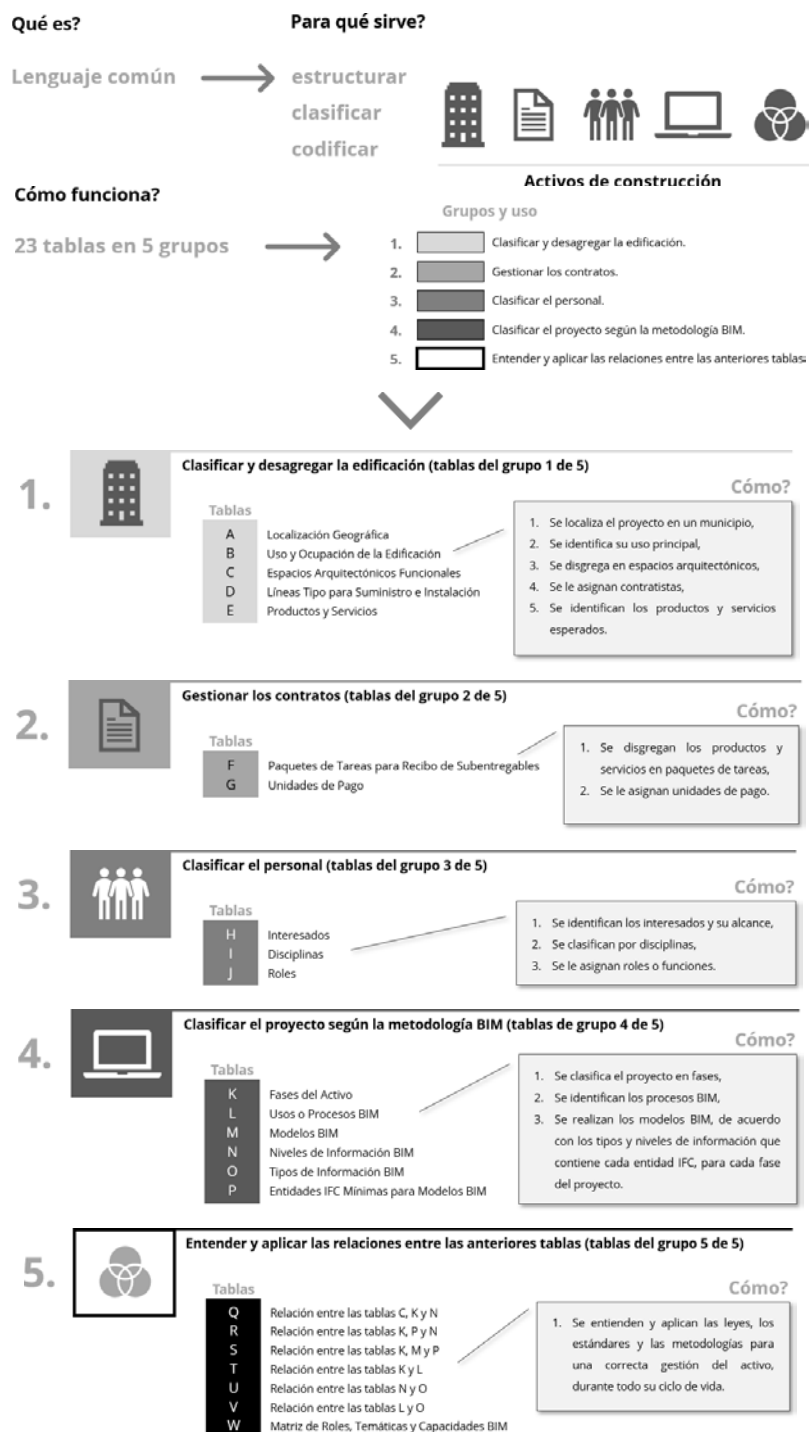


Figura 6. Infografía básica preliminar de ColombiaClass

- *Guía rápida de uso.* Se ha desarrollado una guía rápida de uso del sistema, la cual contiene la descripción de cada tabla. Esta guía se encuentra disponible en: <https://colombiaclass.org/rapida.html>
- *Guía detallada de uso.* Se ha desarrollado una guía detallada de uso del sistema, la cual contiene el marco conceptual, la descripción para el uso integral del sistema y de cada tabla. Debido a su tamaño, esta guía se encuentra disponible en: <https://colombiaclass.org/detallada.html>

5. CONCLUSIONES

Como producto de la revisión de la literatura se ha encontrado evidencia de al menos 200 estándares y sistemas de clasificación utilizados alrededor del mundo que tienen una relación con el sector de la construcción; en el cual hay evidencia de uso de estándares desde 1922 y de sistemas de clasificación desde 1947 hasta nuestros días.

En concreto, se han identificado 109 estándares y 91 sistemas de clasificación, sin embargo, a nivel mundial hay iniciativas adicionales de estandarización de diversos mercados, bienes y servicios. Se aclara que no todos los 91 SC encontrados se encuentran en vigencia actualmente; a pesar de ello se han incluido en la investigación ya que corresponden a la cronología de desarrollo de los SC actuales de cada país y organización.

Así las cosas, también hay evidencia de trabajo constante en la actualización y mejoramiento de los estándares y SC, lo cual prueba su uso y vigencia en el mercado mundial. Respecto de las actualizaciones, se ha encontrado evidencia de al menos 82 actualizaciones a estándares y 64 actualizaciones a sistemas de clasificación relacionados con la industria de la construcción en la última década (2012 – 2022).

Al reconstruir la evolución de los SC desde 1947 hasta nuestros días, es posible evidenciar que la armonización de la semántica en la industria de la construcción – mucho más antigua que BIM – ha tenido el objetivo de estandarizar una estructura documental de uso internacional. En este contexto, muy pocos SC han logrado ser utilizados de manera sostenible.

Para desarrollar y actualizar un SC se requiere tener en cuenta los sistemas existentes, incluso fragmentados, así como las prácticas establecidas y otros enfoques de estructuración de datos como diccionarios y ontologías [39].

Para ello, los diccionarios de datos de buildingSMART International responden a un método de estructuración de la semántica de SC en entornos digitales y web. Estos diccionarios crean correspondencias entre SC y modelos de datos IFC, y están apoyados por la ISO, como es el caso de la ISO 12006:3 Biblioteca BuildingSMART Data Dictionary o International Framework for Dictionaries (IFD), y los SC basados en [15] [16, 17]. Asimismo, el método para crear y administrar diccionarios de datos también está definido en [41].

También fue posible evidenciar como las tecnologías de la información y de las comunicaciones TIC tienen un profundo impacto en los métodos de trabajo de la industria de la construcción a través de la metodología BIM y los estándares de interoperabilidad, sin embargo, se requiere de SC que permitan el mejor aprovechamiento de estos recursos. El papel fundamental de los SC en BIM consiste en estandarizar el vocabulario de los datos contenidos en el modelo digital, los cuales deben estar armonizados y facilitar el consenso entre todos los interesados.

En ausencia de SC nacionales, muchos países a través de la historia han recurrido al uso de SC de otros países, y en algunos casos, hasta adaptarlos para su uso local. A su vez, hay evidencia de SC ampliados o modificados a usos específicos de ciertos mercados, con lo cual es necesario resaltar su pérdida de noción de estándar [39].

Para el caso de Colombia se ha encontrado registro de los siguientes 8 estándares y SC relacionados con la temática de investigación de este proyecto, que han sido desarrollados en nuestro país (Tabla 5).

Tabla 5. Estándares y sistemas de clasificación desarrollados en Colombia

Clasificación/Estándar	Nombre completo/Tema	Año	Actual	Autor/Administrador
Estándar	Análisis de precios unitarios (APU) de referencia para obras viales	2014	2022	INVIAS
Estándar	Guía de aplicación BIM basada en ISO 19650	2020	2020	Grupo de Trabajo BIM Colombia
Estándar	Guía para la adopción BIM en las organizaciones	2020	2020	CAMACOL
Estándar	Guía de estándares, métodos y procedimientos BIM	2020	2020	Grupo de Trabajo BIM Colombia
Estándar	Marco de interoperabilidad para gobierno digital	2019	2019	MinTIC
Estándar	Modelo de datos para el dominio de la administración de tierras - Perfil Colombiano de la ISO 19152	2016	2016	Agencia Nacional de Tierras ANT (Colombia) y secretaría de Estado para Asuntos Económicos SECO (Suiza)
Sistema de Clasificación	Modelo de Almacenamiento Geográfico o Modelo de Datos	2016	2016	ANLA y Minambiente
Sistema de Clasificación	Guía y estándares para el desarrollo gráfico del proyecto	2016	2016	Consejo Nacional de Arquitectura y sus Profesiones Auxiliares (CPNAA)

Respecto de la implementación de SC internacionales en Colombia, el SC utilizado para la codificación de bienes y servicios de la agencia nacional de contratación pública - Colombia Compra Eficiente CCE, es el Código Estándar de Productos y Servicios de la Organización de las Naciones Unidas UNSPSC, versión 14.0801, traducido al español [37].

A su vez, desde el 2020 el gobierno de Colombia a través de la Superintendencia de Industria y Comercio SIC implementó el sistema de clasificación TMClass de la Oficina de Propiedad Industrial de la Unión Europea EUIPO, por sus siglas en inglés). Este SC contiene más de 70.000 términos para seleccionar productos y servicios que se desean proteger con derechos de autor [40].

En síntesis, en Colombia existe la necesidad de un SC de referencia común por parte de todos los interesados en la industria de la construcción. Este SC debe adaptarse al uso en BIM y herramientas digitales.

El correcto funcionamiento y sostenibilidad de un SC se debe en gran manera a la integración del panorama completo de variables que conforman su dinámica de uso y aplicación; es decir, es de vital importancia diseñar, planear y establecer una organización que regule, desarrolle, difunda, ejecute y actualice periódicamente dicho SC y sus complementos.

Si bien, el país se encuentra en un proceso de transformación digital, se debe pensar en el desarrollo de un SC que vincule a la mayoría de los interesados en el corto y mediano plazo, por tanto, este debe ser compatible con la captura y distribución de información analógica, y estar apoyado en políticas y estrategias que conduzcan progresivamente hacia la digitalización total de la gestión de los activos en el mediano y largo plazo.

En este contexto, se hace vital la planeación de la gestión del cambio, con apoyo económico, social, cultural, técnico y tecnológico por parte del Estado, dado el contexto nacional caracterizado por el uso de métodos tradicionales de gestión y la baja inversión de capital en la formación de personal e implementación de nuevas tecnologías [11].

Entre las áreas de gestión más relevantes a nivel nacional, se enfatiza la necesidad de un SC que permita su alineación con la gestión del alcance, los sistemas de adquisiciones, y con el monitoreo y control de los procesos operativos.

Asimismo, debe considerarse la planeación de un proceso de escalabilidad del SC, en donde se vayan integrando cada vez: 1. Nuevas facetas relevantes y de interés a los elementos existentes, 2. La cobertura de nuevas temáticas y áreas de gestión, y 3. Actualizaciones regulares que otorguen vigencia al SC, tanto en contenido como en facilidad de uso y aplicación.

En particular, el sistema de clasificación ColombiaClass requiere de siguientes etapas de desarrollo en donde se desarrolle un sitio web amigable con dispositivos móviles, y que cuente con una base de datos dinámica, con el fin de habilitar la posibilidad de estructurar y gestionar proyectos en línea. Este desarrollo puede llevarse a cabo por etapas, en donde se vayan incluyendo diferentes aplicaciones o áreas de conocimiento de la gestión de proyectos al sistema de gestión en línea.

Para todos los casos y como se ha recalcado anteriormente, esta iniciativa debe ser de uso gratuito, siguiendo la estrategia de los países con más experiencia en sistemas de clasificación para la construcción.

ColombiaClass requiere de un plan de operación y mantenimiento activo y constante, que permita su constante innovación y desarrollo, difusión y actualizaciones, acordes con la dinámica del sector de infraestructura nacional y latinoamericano.

Para que el modelo de gestión empresarial funcione y lleve al objetivo de un incremento en la productividad de los activos, se requieren armonizar los cuatro campos de acción documentados en el marco conceptual de este documento: 1. La política pública, 2. La estrategia, 3. La táctica, y 4. La ejecución [26].

Para dar más detalle, en el campo de la táctica, en el que se encuentran ubicados los SC y la metodología BIM, hay que resaltar que estos no son únicamente herramientas digitales, sino que están conformados por 3 elementos complementarios que deben funcionar en un mecanismo empresarial: 1. El conjunto de procesos de gestión completamente regulados y documentados, con sus formatos, roles y responsabilidades; enfocados en la colección, almacenamiento y análisis de datos; 2. La debida estructura organizacional, es decir, personal capacitado y en constante formación de competencias para la gestión completa de los activos conforme los procesos definidos, y 3. Las herramientas digitales de gestión que apoyan los SC y la metodología BIM.

Dado lo anterior, se deduce que la implementación de un SC aislado y de aplicación independiente no garantiza un incremento en la productividad de los activos de una organización, sino que este hace parte vital de un entorno mayor de gestión compuesto por otros elementos que deben analizarse, implementarse y articularse conforme cada caso y ambiente dinámico particular lo requiera.

Ahora bien, un SC – independientemente de si está basado en un estándar, o compuesto por determinadas tablas o facetas – debe responder a los usos y necesidades de un sector empresarial, conformado por interesados con diferentes visiones del negocio y competencias individuales, grupales y empresariales. Debido a esto, es importante precisar en un SC cuya estructura responda a estas necesidades de manera clara, fácil de usar y que no lleve a múltiples interpretaciones.

Se recomienda ahondar en estudios de oportunidad que lleven al mejor entendimiento de los aspectos complementarios que requiere el país para una correcta estructuración e implementación de mecanismos que permitan el incremento de la productividad de los activos en el sector de infraestructura.

Por su parte, estudios futuros deberían analizar el impacto económico y financiero del uso articulado de tácticas como SC y BIM en la industria de la construcción local. De igual forma, desarrollos futuros deben propender por vincular en estas metodologías la gestión de activos en modelos de economía circular y con enfoque de sostenibilidad ambiental.

Se recomienda enfáticamente el desarrollo de un ecosistema nacional de gestión de activos de infraestructura, que lleve a una sinergia de innovación, logística, emprendimiento e inteligencia colectiva en el sector. Este ecosistema debería generar y administrar entre otros aspectos los siguientes:

- Estrategia digital para el incremento del valor de los activos, la productividad y la competitividad.
- Estrategia para la transformación de los datos en información relevante, comercial e interoperable. Nuevas oportunidades comerciales a partir de los datos, una transformación del negocio público y privado a nivel nacional.
- Equipo de expansión, diversificación y potencialización de negocios digitales.

- Estandarización de bases de datos y procesos.
- Estandarización del uso articulado entre Sistemas de Información Geográfica SIG, y BIM.
- Unificación de fuentes de verdad y consulta ciudadana.
- Eliminación de aplicaciones que no generan valor agregado.
- Laboratorio de captura, procesamiento y análisis de datos.
- Paneles de control estratégicos, tácticos, operativos y de información pública, para la toma de decisiones basadas en datos.

REFERENCIAS

- [1] Foro Económico Mundial. (2019). The Global Competitiveness Report 2019. FEM.
- [2] Foro Económico Mundial. (2022). Digital Twin Cities: Framework and Global Practices. FEM.
- [3] Cámara Colombiana de la Construcción. (2018). Informe de productividad. Sector construcción de edificaciones. Camacol.
- [4] McKinsey. (2017). Reinventing Construction: A route to higher productivity. McKinsey and Company.
- [5] Cámara Colombiana de la Construcción. (2019). La importancia de los encadenamientos productivos en el sector de la construcción. Camacol.
- [6] Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2018). CONPES 3918. Estrategia para la Implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible - ODS en Colombia. DNP.
- [7] Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2019). CONPES 3975. Política Nacional para la Transformación Digital e Inteligencia Artificial. DNP.
- [8] Departamento Nacional de Planeación. (2020). Estrategia Nacional BIM 2020 - 2026. DNP.
- [9] Organización Internacional de Normalización. (2018). Organización y digitalización de la información sobre edificios y obras de ingeniería civil, incluyendo el modelado de información de construcción BIM - Gestión de la información utilizando BIM - Parte 2: Fase de entrega de los activos. ISO 19650:2.
- [10] Organización Internacional de Normalización. (2020). Organización y digitalización de la información sobre edificios y obras de ingeniería civil, incluyendo el modelado de información de construcción BIM - Gestión de la información utilizando BIM - Parte 3: Fase operativa de los activos. ISO 19650:3.
- [11] Cámara Colombiana de la Construcción. (2018). Hoja de Ruta para la Implementación BIM. Camacol.
- [12] Colombia Compra Eficiente. (2022). Colombia Compra Eficiente - Clasificador de bienes y servicios. CCE.
- [13] Organización Internacional de Normalización. (2015). Construcción de edificios. Organización de la información sobre obras de construcción. Parte 2: Marco para la clasificación. ISO 12006:2.
- [14] Organización Internacional de Normalización. (2007). Construcción de edificios. Organización de la información sobre obras de construcción. Parte 3: Marco para información orientada a objetos. ISO 12006:3.
- [15] Organización Internacional de Normalización. (2022). Sistemas, instalaciones, equipos y productos industriales. Principios de estructuración y designaciones de referencia. Parte 1: Reglas básicas. ISO EIC 81346-1.
- [16] Organización Internacional de Normalización. (2019). Sistemas, instalaciones, equipos y productos industriales. Principios de estructuración y designaciones de referencia. Parte 2: Clasificación de objetos y códigos para clases. ISO EIC 81346-2.
- [17] Organización Internacional de Normalización. (2018). Sistemas, instalaciones, equipos y productos industriales. Principios de estructuración y designaciones de referencia. Parte 12: Obras de construcción y servicios de edificación. ISO 81346-12.
- [18] Organización Internacional de Normalización. (2013). Sistemas de gestión de terminología, conocimiento y contenido - Aspectos conceptuales para el desarrollo e internacionalización de sistemas de clasificación. ISO 22274.
- [19] Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones. (2019). Modelo de madurez para la transformación digital empresarial. Mintic - Centros de transformación digital empresarial.
- [20] Organización Internacional de Normalización. (2018). Estructuras Desagregadas de Trabajo para la gestión de programas y proyectos. ISO 21511.
- [21] BuildingSMART. (2018). Rapport d'analyse. Les systèmes de classification et le BIM. IPFIG Innovations Technologiques.
- [22] Alkasasbeh M. et al. (2020). A unified work breakdown structure-based framework for building asset management. Journal of Facilities Management.
- [23] Natspec. (2022). TECHreport - Information classification systems and the Australian construction industry. Natspec Construction Information.
- [24] Departamento Nacional de Planeación. (2020). Estrategia Nacional BIM 2020 - 2026. DNP.
- [25] Organización Internacional de Normalización. (2018). Organización y digitalización de la información sobre edificios y obras de ingeniería civil, incluyendo el modelado de información de construcción BIM - Gestión de la información utilizando BIM - Parte 1: Conceptos y principios. ISO 19650:1.

- [26] Project Management Institute. (2017). Project Management Book of Knowledge - PMBoK Guide. PMI.
- [27] Project Management Institute. (2016). Construction Extension to the PMBoK Guide. PMI.
- [28] Lukka K. (2003). The Constructive Research Approach. Case Study Research in Logistics. Turku school of economics and business administration.
- [29] Oyegoke A. (2011). The constructive research approach in project management research. International Journal of Managing Projects in Business 4, 573-595.
- [30] Creswell J. (2009). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. Sage Publications.
- [31] Ardila R. y Mejía G. (2021). Fundamentos conceptuales y métodos para determinar la conformación de cuadrillas de trabajo en procesos constructivos. En Serna A. (ed.), Desarrollo e innovación en Ingeniería (pp. 528-544). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- [32] Ameyaw E. et al. (2016). Application of Delphi method in construction engineering and management research: A quantitative perspective. Journal of Civil Engineering and Management 22(8), 991-1000.
- [33] Association for the Advancement of Cost Engineering. (2015). Total cost management framework - An integrated approach to portfolio, program, and project management. AACE International.
- [34] International Project Management Association. (2018). Individual Competence Baseline. Reference guide for consultants, coaches, and trainers. IPMA.
- [35] International Project Management Association. (2015). Individual Competence Baseline for Project, Programme & Portfolio Management. IPMA.
- [36] Office of Government Commerce. (2009). Éxito en la gestión de proyectos con Prince2. Oficina de Comercio Gubernamental del Reino Unido. OGC.
- [37] Colombia Compra Eficiente. (2022). Guía para la codificación de bienes y servicios de acuerdo con el código estándar de productos y servicios de Naciones Unidas - versión 140801. CCE.
- [38] PlanBIM. (2019). Estándar BIM para Proyectos Públicos - Intercambio de Información entre Solicitante y Proveedores. PlanBIM.
- [39] Jackson P. (2020). Nordic Study of Classification Systems for Infrastructure & Transportation. BuildingSMART.
- [40] Superintendencia de Industria y Comercio. (2022). Superintendencia de Industria y Comercio se une a la base de datos TMCLASS para la clasificación de marcas. SIC.
- [41] Organización Internacional de Normalización. (2020b). Modelado de información de construcción BIM y otros procesos digitales utilizados en la construcción. Metodología para describir, crear y mantener propiedades en diccionarios de datos interconectados. ISO 23386.

Análisis comparativo técnico y económico de la adición de asfaltita a una mezcla asfáltica densa en frío

José Rodrigo Alarcón Dallos¹

Wilmer Orlando Galvis Pinzón²

Pedro Antonio Suarez Rivera³

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

Con la incorporación de asfaltita a los agregados se modifica las propiedades mecánicas y químicas de las mezclas asfálticas en frío para mejorar su comportamiento en servicio. Se reporta los resultados del análisis comparativo desde el punto de vista técnico y económico de una mezcla densa en frío con la adición de asfaltita. El diseño de las diferentes mezclas se realizó por las metodologías Marshall y Ramcodes, previa caracterización de los agregados, con el fin de obtener puntos de comparación en el cumplimiento de las especificaciones y propiedades volumétricas obtenidas, y determinar si la asfaltita puede ser utilizada en la construcción de capas de estructuras de pavimentos flexibles en Colombia. La mezcla diseñada con asfaltita para la gradación del límite central de las especificaciones cumple los criterios de diseño para una mezcla densa en frío usada en labores de bacheo, con excepción del flujo. Las mezclas asfálticas en frío modificadas con asfaltita presentan un desarrollo de estabilidad más alto, haciendo que sean más rígidas y más frágiles debido a que su flujo también es mayor. Estas mezclas pueden tener un mejor comportamiento que las mezclas convencionales, a un costo no muy alto. Es prometedor el uso de las asfaltitas de Pesca Boyacá como agregado fino en una mezcla densa en frío con emulsión asfáltica, ya que aumenta su estabilidad a un costo de fabricación inicial inferior al costo de una mezcla convencional. Es importante y necesario seguir investigando las asfaltitas como material para pavimentos asfálticos, sobre todo la implementación de tramos de prueba con instrumentación y seguimiento para documentar su comportamiento en servicio.

¹ Ingeniero en Transportes y Vías, Especialista en Ingeniería de Vías Terrestres y Magíster en Ingeniería.

Contacto: joserodrigo.alarcon@uptc.edu.co

² Ingeniero en Transportes y Vías.

Contacto: wgalvis125@gmail.com

³ Ingeniero en Transportes y Vías.

Contacto: ingpedro2703@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos de la infraestructura vial en Colombia y la problemática medioambiental creciente, genera la necesidad de investigar en busca de nuevos materiales o de mejorar la calidad de los existentes para hacer que las estructuras de pavimentos tengan una mayor vida útil, para ello es importante caracterizar y entender el comportamiento de los materiales que brindan una alternativa al uso de los materiales convencionales.

La asphaltita se ha usado, entre otras cosas, en la construcción de capas de una estructura de pavimento, en algunos casos estas capas no se diseñan y construyen de manera técnica, lo que lleva a pavimentos con comportamientos deficientes. Este estudio pretende coadyubar en el aprovechamiento adecuado de las asphaltitas de Pesca, Boyacá, como parte integrante de una capa de una estructura de pavimento flexible.

En el país se conocen yacimientos de asfalto natural en Departamentos como Boyacá, Caldas, Caquetá, Cesar, Cundinamarca, Santander y Tolima; se tiene conocimiento de que al menos cinco de ellos se encuentran actualmente en explotación, facilitando el uso de la asphaltita en proyectos viales [1].

La asphaltita es un hidrocarburo sólido derivado del petróleo, su color es negro brillante hasta negro mate. Es un producto mineral, liviano, quebradizo, con escasas impurezas y alto poder calórico, de aspecto resinoso y fractura conoidal en las formas frescas, dotadas de un punto de fusión elevado, superior a 110°C. Químicamente están constituidas por hidrocarburos muy pobres en oxígeno y parafinas cristalizables, siendo compuestos de alto peso molecular [2].

Son variadas las investigaciones realizadas que evalúan el comportamiento de las asphaltitas como parte integrante de un pavimento, entre ellas se puede mencionar: el mejoramiento de vías secundarias y terciarias en Colombia con el uso de mezcla asfáltica natural en frío (asphaltitas) [3]; análisis del uso y comportamiento de la asphaltita como base y sub base granular en pavimentos [4]; en mezclas densas en caliente MDC2 [5], mezclas densas en frío [6], como alternativa al momento de construir, rehabilitar la infraestructura vial [7], mezclas asfálticas modificadas con asphaltitas [8], asfaltos modificados con asphaltita durante el envejecimiento [9], asfalto modificado con caucho reciclado de llantas de automóviles en desuso y asphaltita en una misma mezcla, a diferentes temperaturas y frecuencias [10].

En general, la forma de proceder en las investigaciones sobre asphaltitas, pasa por la caracterización física y química de los materiales usados, la determinación de la fórmula de trabajo y la realización de pruebas de comportamiento o desempeño [1, 5, 6, 11-16]. Igualmente, se ha estudiado la asphaltita y su influencia sobre las propiedades físicas, reológicas y térmicas de un cemento asfáltico [17], y su uso como combustible dado su poder calórico [18].

2. MÉTODO

Esta investigación se llevó a cabo utilizando una metodología desarrollada en cuatro fases, en la fase uno se realizó una exhaustiva revisión del estado del arte referente a las diferentes metodologías utilizadas en investigaciones sobre el uso de las asphaltitas en mezclas asfálticas. En la fase dos se realizó la recolección y caracterización física y mecánica de los diferentes materiales utilizados en la fabricación de una mezcla asfáltica en frío con la incorporación de asphaltitas de Pesca. En la fase tres se diseñó y fabricó las mezclas asfálticas, tanto convencional con emulsión, como con la adición de asphaltita, y en la fase 4 se caracterizó las diferentes mezclas asfálticas y se analizó, desde el punto de vista técnico, el posible uso de la asphaltita en una mezcla asfáltica.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización de materiales

El material granular se consiguió en una cantera de la región de Tunja, la asphaltita se extrajo de la cantera Santa Teresa en el municipio de Pesca, y la emulsión asfáltica fue suministrada por una empresa privada. A

estos materiales se les realizó la caracterización física y química, y se determinó el cumplimiento a la luz de las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías INVIAS de 2013 [19] para el diseño de mezcla densa en frío con emulsión asfáltica y la adición de asfaltita, para nivel de tránsito NT-1.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de caracterización realizados a la asfaltita. La muestra ensayada presenta una textura suave, color negro, olor orgánico, partículas finas, su condición de humedad es importante al tacto, el equivalente de arena indica que la asfaltita se encuentra limpia una vez que la cantidad relativa de arcilla o contaminantes es baja y es no plástica. La asfaltita está compuesta por agregado fino y asfalto natural.

Tabla 1. Caracterización de la asfaltita

Ensayo	Resultado	Especificación
Equivalente de arena de suelos y agregados finos (%) (INV E-133-13)	67	50% Min
Gravedad específica y absorción del agregado fino (Gsb) (INV E-222-13)	2,50	% Absorción 2,86%
Gravedad específica y absorción del agregado fino (Gsb-sss) (INV E-222-13)	2,57	% Absorción 2,86%
Gravedad específica y absorción del agregado fino (Gsa) (INV E-222-13)	2,70	% Absorción 2,86%
Extracción cualitativa de asfalto (%) (INV-E-732-13)	4,0	N.A.
Limite liquido (%) (INV-E-125-13)	15,27	≤40
Limite plástico	N.P.	N.P.
Penetración 0,1 mm (INV E-706-13)	224	200 - 250
Punto de ignición y llama mediante la copa abierta de Cleveland °C (INV E-707-13)	95°C	≥ 200°C

En la Tabla 2 se muestran los resultados de los ensayos de caracterización realizados al material granular. La muestra ensayada presenta una textura rugosa, de color gris y amarillo, partículas de forma angulosa sin pulimiento, con caras fracturadas, cumple los requisitos de las especificaciones INVIAS 2013 para cualquier tipo de base granular y para los niveles de tránsito NT1, NT2 y NT3.

Tabla 2. Caracterización del material granular

Ensayo	Resultado	Especificación
Porcentaje de caras fracturadas (2 caras) (INV E-227-13)	100%	60% mín.
Índice de aplanamiento (INV E-230-13)	27,90%	≤35
Índice de alargamiento (INV E-230-13)	26,50%	≤35
Gravedad específica y absorción del agregado grueso (Gsa) (INV E-222-13)	2,69	% Absorción 1,24%
Gravedad específica y absorción del agregado grueso (Gsb) (INV E-223-13)	2,60	% Absorción 1,24%
Gravedad específica y absorción del agregado grueso (Gsb-sss) (INV E-223-13)	2,63	% Absorción 1,24%
Resistencia al desgaste de los agregados Máquina de los Ángeles (INV E-218-13)	21,22%	< 35%
Limite liquido (INV-E-125-13)	16,0%	≤25
Índice plástico (INV-E-125-13)	0,58%	≤3
Perdida en el ensayo de sanidad y solidez en sulfato de sodio (I.N.V. E-220 -13)	8%	< 12%

En la Tabla 3 se muestra el análisis químico realizado a la asfaltita de la cantera Santa Teresa.

Tabla 3. Análisis químico de la Asfaltita

Ensayo	Método	Resultado (%)
Contenido de cenizas	ASTM D3174	92,5
Contenido de humedad	ASTM D3173	0,4
Contenido de materia volátil	ASTM D3175	7,1

Se utilizó una emulsión asfáltica de rompimiento lento CRL1, en la Tabla 4 se muestran los resultados de la caracterización y el cumplimiento a la luz de las especificaciones INVIAS 2013 en su artículo 411.

Tabla 4. Caracterización de la emulsión

Ensayo	Resultado	Especificación	
		Mín.	Máx.
Viscosidad Saybolt Furod a 25 °C, s (INV E 763 13)	25	20	200
Estabilidad durante almacenamiento (24 horas),% (INV E 764-13)	0,8		1
Sedimentación a los 5 días,% (INV E 764-13)	1,6		5

Destilación: Contenido de asfalto residual,% (INV E 762-13)	60	57
Tamizado: Retenido tamiz No. 20 (850 m),% (INV E 765-13)	0,014	0,10
Carga partícula (INV E 767-13)	Positiva	Positiva
PH (INV E 768-13)	2,81	6
Ensayos sobre el residuo de destilación		
Penetración (25°C ,100 gr, 5 s), 0,1 mm (INV E 706-13)	83	60 100
Ductilidad (25°C ,5 c/min) cm (INV E 702-13)	46	40

3.2 Análisis granulométrico

Al analizar el comportamiento de la curva granulométrica del agregado grueso, se determina que no cumple con la gradación de una mezcla asfáltica densa en frío (MDF-19), en la Figura 1 se muestra su granulometría.

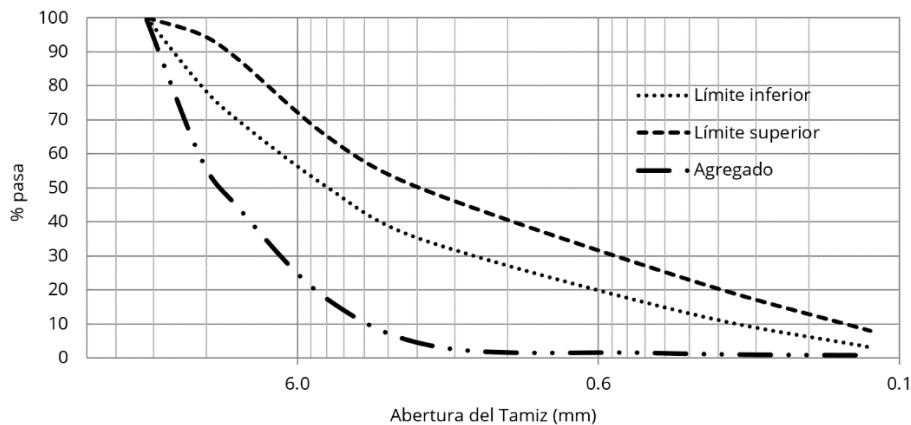


Figura 1. Curvas granulométricas del agregado grueso y especificación para una mezcla MDF – 19

En cuanto al análisis granulométrico del agregado fino (asfaltita), se determina que es un material mal gradado y no cumplen con los requerimientos exigidos para el agregado fino, su granulometría se muestra en la Figura 2.

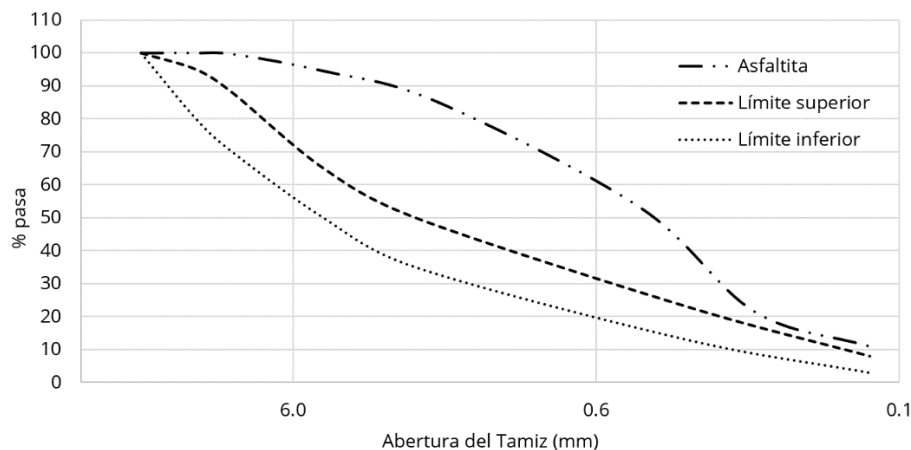


Figura 2. Curvas granulométricas de la asfaltita y especificación para una mezcla MDF-19

Los agregados pétreos deben cumplir con la gradación especificada para ser considerados apropiados en el diseño de una mezcla asfáltica.

Se requiere que las partículas estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño esté presente en ciertas proporciones. Dadas las gradaciones de los materiales disponibles y teniendo en cuenta que se quiere diseñar una mezcla asfáltica MDF-19, se realizó la estabilización granulométrica con la ayuda de la aplicación Solver del software EXCEL.

En la Figura 3 se muestra el resultado de la mezcla, franja central, la cual combina el 49% de agregado grueso y 51% de agregado fino (asfaltita). La dosificación muestra buenos resultados, sin embargo, hay que ser muy cuidadosos en el procedimiento de campo, pues se pueden presentar deficiencias en las gradaciones.

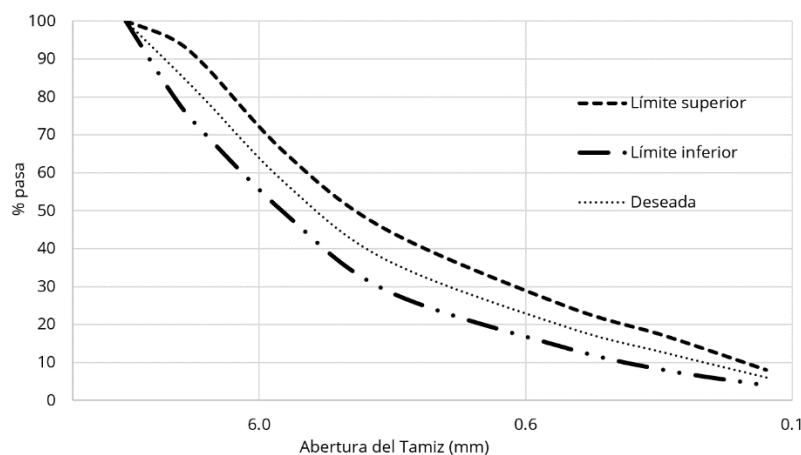


Figura 3. Ajuste granulométrico, franja central, de la mezcla de agregado grueso y asfaltita

3.3 Diseño experimental

Con el objeto de encontrar la fórmula de trabajo, por la metodología Marshall se realizó el diseño de tres mezclas con una compactación constante de 50 golpes por cada cara para un nivel de tránsito NT1, con un experimento factorial de dos factores; el contenido de asfalto variable en 1% para cada mezcla y la gradación variable de acuerdo a la ubicación en la franja granulométrica. El procedimiento adoptado para la preparación de las briquetas fue el propuesto por la Universidad de Illinois mediante el método Marshall modificado para mezclas densas en frío, con cualquier grado de emulsión asfáltica y agregados de granulometría densa [20].

Igualmente, se realizó el diseño de tres mezclas mediante la metodología Ramcodes con porcentajes de asfalto constantes para cada granulometría y con una compactación constante de 50 golpes por cada cara de acuerdo a Ramsoft [21]. A través de Arizada, se analizó el comportamiento mecánico de las diferentes mezclas diseñadas, dentro del marco matemático y estadístico de análisis de Ramcodes, incluyendo las variables más influyentes de cada una de las mezclas.

4. DISCUSIÓN

4.1 Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla

El uso de las mezclas en frío y su clasificación depende, entre otros parámetros, de las características granulométricas y textura superficial [22]. Tanto el origen del material granular como la granulometría afectan las propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas [23]. El módulo resiliente de las mezclas asfálticas modificadas se ve impactado, entre otros, por la granulometría de la mezcla de agregados y por las variaciones que se puedan producir en las propiedades volumétricas y gravimétricas de la mezcla asfáltica [24].

Existe suficiente evidencia que indica que las granulometrías densas son las deseables en la elaboración de las mezclas asfálticas debido a que mitigan los efectos de ahuellamiento y presentan propiedades mecánicas y dinámicas mayores a las otras mezclas. Las mezclas abiertas o de granulometría discontinua exhiben una mayor susceptibilidad a la deformación plástica y son aún más vulnerables al ahuellamiento a temperaturas altas, que las mezclas densas o elaboradas con granulometrías continuas.

Se determinó la incidencia en el ahuellamiento de mezclas asfálticas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y el Instituto Distrital Urbano (IDU), al variar su granulometría en la franja superior, inferior y media, se determinó que la deformación permanente está directamente relacionada con las franjas granulométricas y la energía de compactación [25].

Los factores que influyen en las propiedades volumétricas y mecánicas de una mezcla se han investigado intensamente en el pasado, incluyendo, entre otros, los tipos de gradación y el contenido de emulsión asfáltica [26]. Las prácticas actuales para el diseño de mezclas de asfalto y las pruebas de aceptación se

basan en propiedades volumétricas [27]. Los parámetros que afectan el rendimiento de una mezcla asfáltica fría son, entre otros, el método de compactación, el nivel de compactación, los aditivos y la gradación [28].

En este estudio, para analizar la influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla, se tuvo en cuenta cuatro parámetros volumétricos; vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral VAM, vacíos llenos con asfalto VFA y gravedad específica bulk neta de la mezcla asfáltica G_{mb} . Además, se tomó los contenidos de emulsión con dos puntos por arriba y dos puntos por abajo del obtenido en los cálculos de recubrimiento, para las diferentes gradaciones de las franjas superior, media e inferior de las especificaciones.

- *Vacíos con aire V_a* . Una buena gradación para una mezcla de asfalto es aquella que proporciona el empaquetamiento más denso de partículas, aumenta la estabilidad al aumentar el número de puntos de contacto entre las partículas y reduce los vacíos de aire [29].

Los valores para las mezclas de las franjas media e inferior muestran un comportamiento similar, mientras que para la mezcla de la franja superior se tienen valores altos respecto a los especificados. Este aspecto es normal si se tiene en cuenta que una gradación gruesa presenta menor área superficial, lo que se traduce en mayor necesidad de asfalto respecto a una mezcla más fina. En este caso en particular, y para cumplir con los rangos de diseño, el porcentaje de asfalto residual debe ser del 5% al 6.2% aproximadamente.

Tener presente que el porcentaje de vacíos con aire y el porcentaje de asfalto incide directamente en el comportamiento de la mezcla en servicio y en la economía de la mezcla. En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos. Es importante tener en cuenta que normalmente la variabilidad de los vacíos de aire en el laboratorio es menor que la variabilidad de los vacíos de aire en el campo [30].

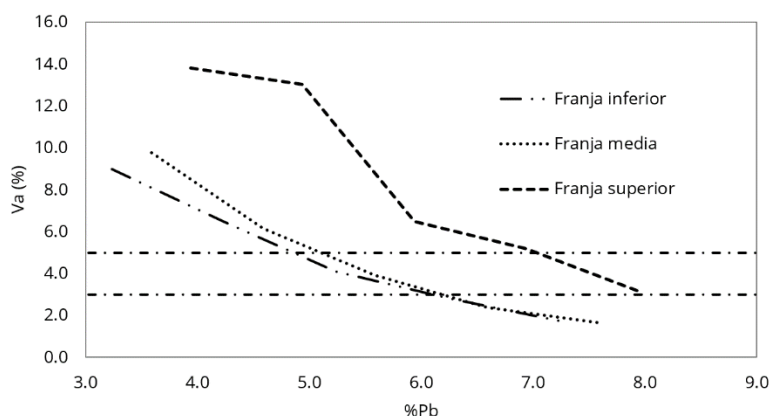


Figura 4. Comportamiento de los vacíos con aire para diferentes granulometrías

Así mismo, los vacíos de aire altos pueden producir a la mezcla daño por humedad, mientras que los bajos vacíos de aire podrían mejorar la durabilidad al hacer que la mezcla sea menos permeable a la penetración de aire y agua. Sin embargo, los vacíos de aire demasiado bajos podrían generar que el exceso de asfalto exuda la mezcla bajo el paso del tráfico en el campo [31].

- *Vacíos en los agregados minerales VAM*. Un estudio realizado para investigar la influencia de los VAM en los proyectos de pavimentación de Minnesota, encontró que hay diferencia fundamental entre los VAM de diseño y después de la construcción, lo que puede ser causa de muchas fallas relacionadas con la durabilidad, debido a la degradación de los agregados durante la construcción que tiende a disminuir los VMA y a aumentar el área superficial de los agregados en la mezcla y por ende una mayor absorción de asfalto [32].

Las mezclas diseñadas en el presente estudio, cumplen con la especificación en este parámetro, sin embargo, y dado que a mayor porcentaje de VAM, mayor porcentaje de asfalto requerido y mayor posibilidad de exudación bajo altas temperaturas, no se recomendaría porcentajes de asfalto residual superiores al 5.5%. En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos.

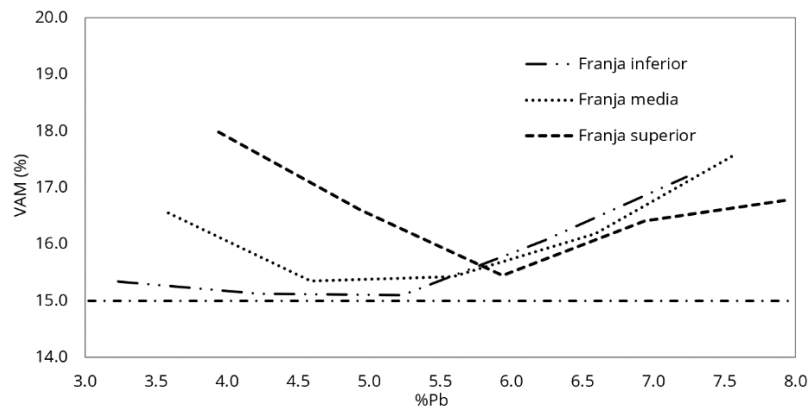


Figura 5. Comportamiento de los vacíos en los agregados minerales (VAM) para diferentes granulometrías

- *Vacíos llenos de asfalto VFA.* En este estudio, para las mezclas con la granulometría de las franjas media e inferior, si el contenido residual de asfalto es menor al 5%, éstas presentarían fallas tipo pavimentos quebradizos, agrietamientos prematuros, desgaste y desprendimiento una vez que el asfalto residual no cubriría en su totalidad el agregado y por ende los vacíos con aire. En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos.

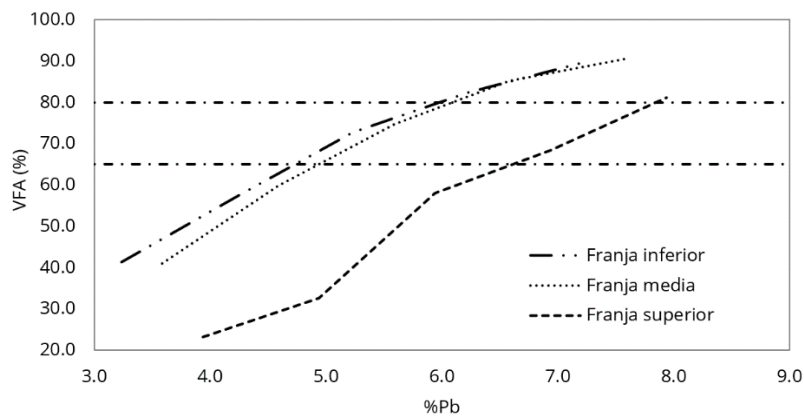


Figura 6. Comportamiento de vacíos llenos de asfalto (VFA) para diferentes granulometrías

- *Gravedad específica bulk neta de la mezcla asfáltica Gmb.* El comportamiento de las densidades es muy similar para las granulometrías de las franjas inferior y media, no así para la franja superior, la mayor densidad se logra con porcentajes de asfalto residual en el rango de 5,4% a 6,4%. En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos.

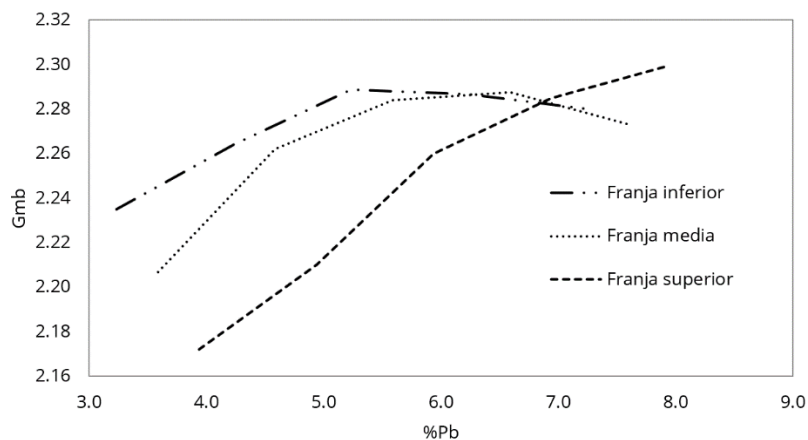


Figura 7. Comportamiento de la gravedad específica bulk neta (Gmb) para diferentes granulometrías

4.2 Contenido de bitumen

También se analizó la influencia de los agregados en los parámetros volumétricos de las mezclas, mediante el polígono de vacíos obtenidos por la metodología Ramcodes. Existe una evidente cercanía de los polígonos

de las mezclas diseñadas con las granulometrías de las franjas central e inferior, mientras que la mezcla diseñada con la granulometría de la franja superior (gruesa) indica un polígono de vacíos muy diferente acorde con la diferencia en el comportamiento de sus densidades, como se observa en la Figura 8.

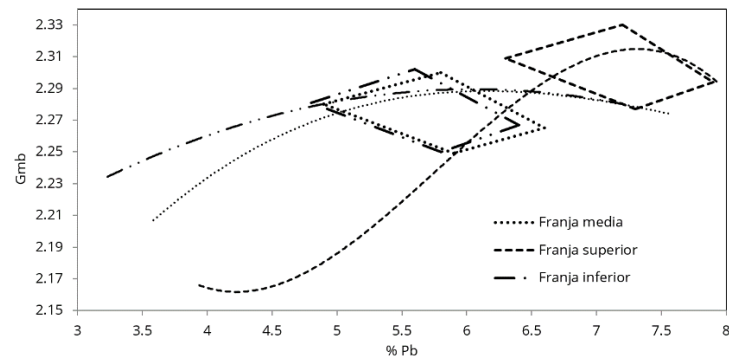


Figura 8. Polígono de vacíos Ramcodes para las diferentes granulometrías

- Obtención del contenido de bitumen en la mezcla por método Marshall. Para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto se utilizó el procedimiento recomendado por el Instituto del Asfalto Americano y la metodología gráfica de la National Asphalt Pavement Association (NAPA). En las Figuras 9 y 10 se muestra, a modo de ejemplo, el proceso para determinar los rangos aceptables de contenidos de bitumen en el diseño Marshall para la obtención de la fórmula de trabajo.

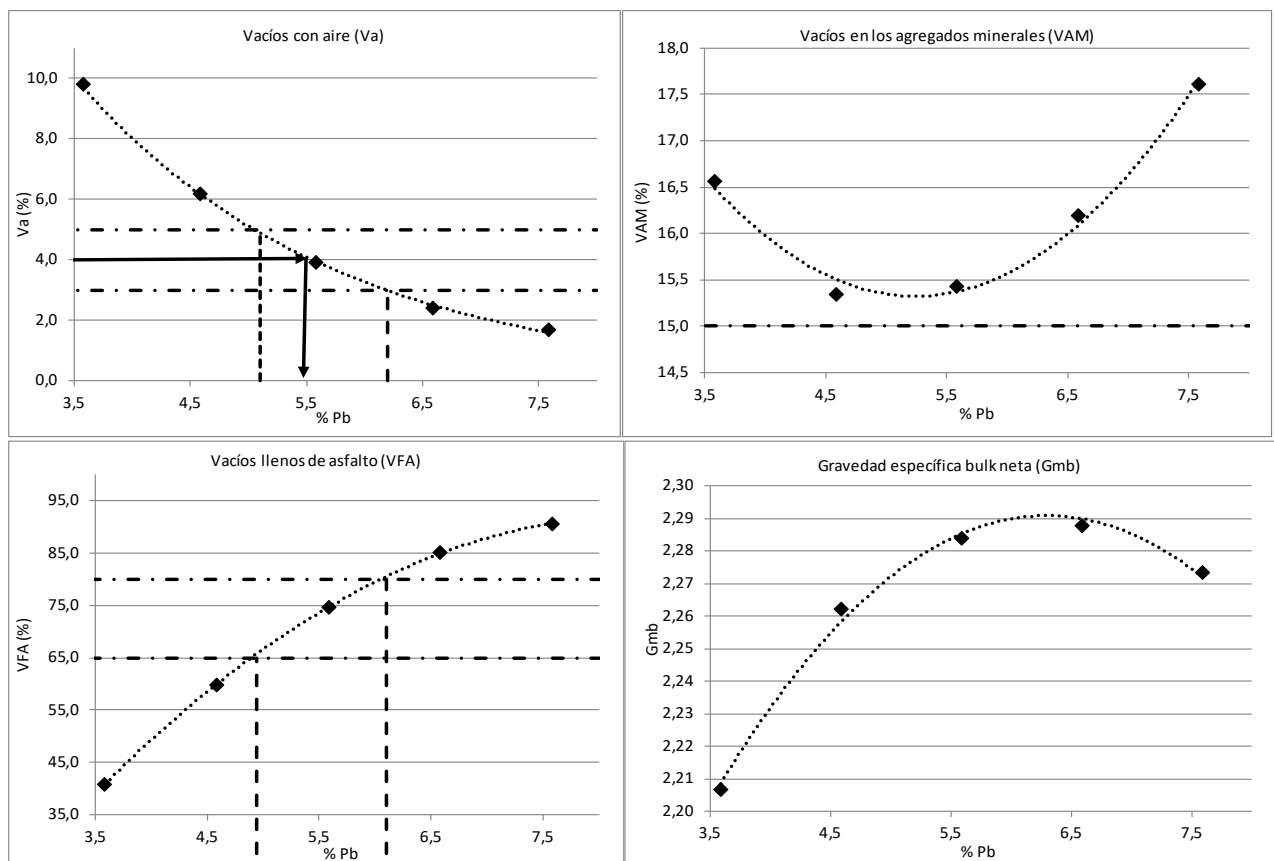


Figura 9. Rangos aceptables de contenido de asfalto en la mezcla para el diseño Marshall

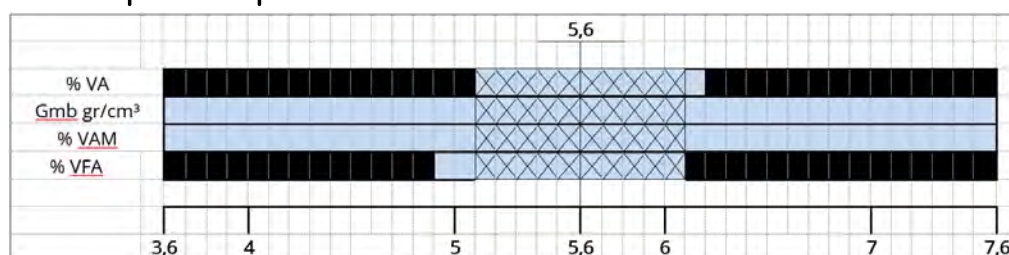


Figura 10. Determinación gráfica del rango óptimo de bitumen para el diseño Marshall

Se obtiene un porcentaje de bitumen del 5,5% y 5,6% por las metodologías IDA y NAPA respectivamente. De forma similar se procedió para las franjas media y superior, los resultados y el comportamiento mecánico se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados diseño de mezclas con Asfaltita

Mezcla	Franja fina		Franja media		Franja gruesa	
	M1	R1	M2	R2	M3	R3
% Asfalto residual	5,4	5,7	5,5	5,8	7,0	7,2
Gmb gr/cm ³	2,286	2,280	2,284	2,279	2,311	2,308
Estabilidad (Lb)	453,0	482,4	570,0	595,4	515,0	544,3
Flujo (mm)	6,0	6,0	6,5	6,7	10,4	10,1
% Va	4,0	3,9	4,0	3,9	4,0	3,9
% VAM	15,3	15,8	15,3	15,8	15,5	15,8
% VFA	74,2	75,4	73,8	75,5	72,0	75,4

En la Tabla 6 se presentan los requisitos especificados para una mezcla densa en frio convencional diseñada por Marshall [33].

Tabla 6. Requisitos para una mezcla densa en frio convencional [33]

Método de diseño	Valores límites	
	Mínimo	Máximo
MARSHALL (AASHTO T 245, ASTM D 1559 y MS-14)		
Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen	50	75
1. Con emulsión asfáltica	75	75
2. Con asfaltos líquidos		
Estabilidad de acuerdo al uso de la mezcla		
1. Para bacheo	2,224 N (500 libras)	
2. Para pavimentación	3,336 N (750 libras)	
Fluencia en 0.25 mm (0.01 pulgada)	8	16
Relación Estabilidad/Fluencia (lb./0.01 pulg.)	120	225
Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada	3	15
Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283 Resistencia retenida		
1. Con emulsión asfáltica	50%	
2. Con asfaltos líquidos	75%	
Porcentaje de vacíos relleno con asfalto	65	80

Según los resultados obtenidos y teniendo en cuenta las especificaciones, se determina que las mezclas elaboradas para la franja central y superior cumplen con las especificaciones, a excepción del flujo.

4.3 Análisis de resultados obtenidos por las metodologías Ramcodes y Marshall

Se realizó un estudio de sensibilidad basado en las técnicas estadísticas de análisis de experimentos factoriales según Ramcodes, en el cual se estudia el comportamiento de gravedad específica bulk Gmb y porcentaje de asfalto (% Pb) en una mezcla asfáltica. Este tipo de análisis tiene una gran ventaja, una vez que Ramcodes cuenta con un módulo que mediante un sencillo y eficiente método estadístico de control de calidad de compactación protege contra la aceptación de lotes defectuosos o el rechazo de lotes satisfactorios [21].

Una mezcla asfáltica debe cumplir requerimientos de propiedades mecánicas tales como estabilidad y flujo, por esta razón la representación gráfica de los valores de respuesta en el marco Gmb -%Pb generan una gráfica de contorno que viene a ser una imagen de la superficie de respuesta para el parámetro mecánico seleccionado, permitiendo una visión de la variación de las propiedades mecánicas dentro del área donde se cumplen las especificaciones de vacíos [21].

En la Figura 11 se observa que, para la franja central, con un% de asfalto residual entre 6,25 y 7%, se encuentran los más altos valores de estabilidad en el rango de 550 a 600 lb; para la franja inferior con un% de asfalto residual entre 5,75 y 6%, se encuentran los valores más altos de estabilidad en el rango de 470 a 480 lb y para la franja superior con un% de asfalto residual entre 6.5 y 6.75% se dan los valores más altos

de estabilidad en el rango de 500 a 510 lb. En cuanto al flujo se evidencia en las tres franjas que a mayor contenido de asfalto residual los flujos son más altos.

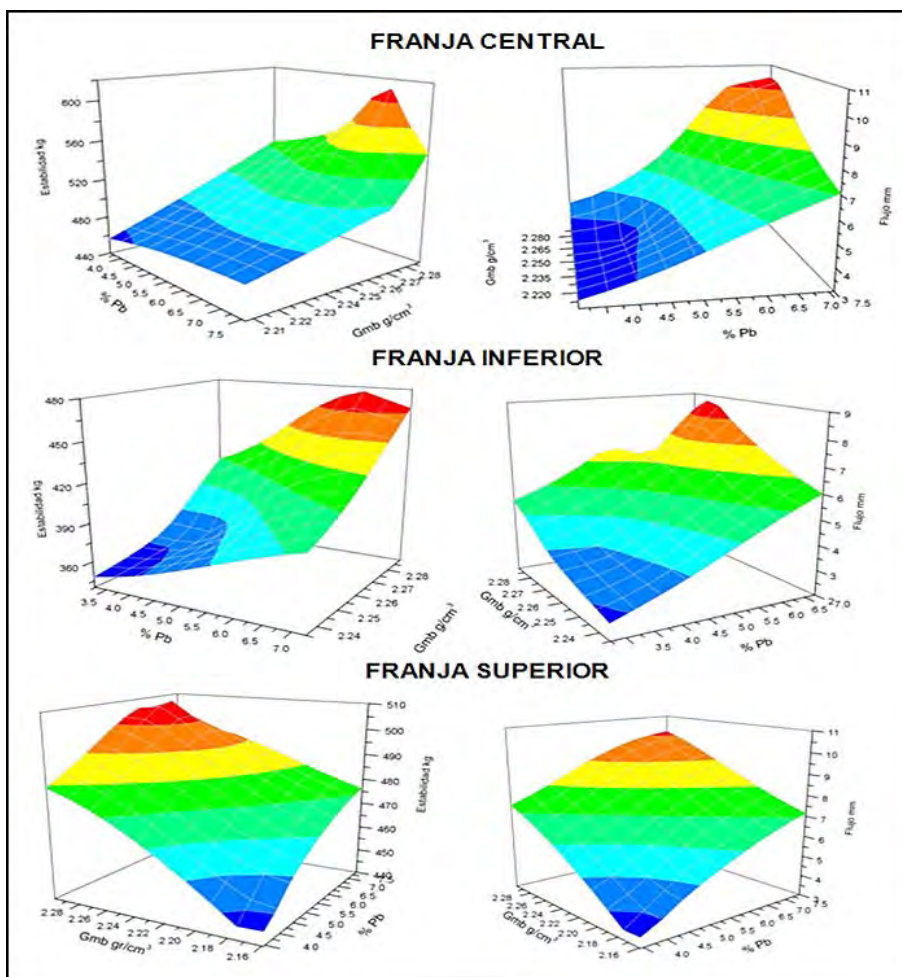


Figura 11. Comportamiento de las propiedades mecánicas para las mezclas diseñadas con asfaltita por Marshall

- Análisis por medio de los mapas de contorno para estabilidad y flujo de las mezclas.* El sistema estadístico toma en cuenta el nivel de riesgo en obra y protege contra errores típicos de aceptación de las mezclas, es decir la aceptación de una mezcla defectuosa o el rechazo de mezclas aceptables; esta respuesta se obtiene superponiendo el polígono de vacíos sobre las superficies de respuesta (mapas de contorno) obtenidas mediante el paquete estadístico Origin, lo anterior con el fin de incrementar notablemente la cantidad y calidad de información para establecer diseños realistas [22].

Las metodologías Marshall y Ramcodes generan resultados convergentes, una vez que los valores obtenidos en laboratorio para el diseño Marshall coinciden relativamente a la respuesta dada por el mapa de contorno, el cual estadísticamente sugiere una respuesta más acertada para estabilidad y flujo de cada una de las mezclas, como se puede observar en la Figura 12. Del mismo modo, se evidencia que los resultados obtenidos por la metodología Marshall para cada mezcla, se encuentran dentro de la región aceptable en el polígono de Ramcodes.

- Criterios de diseño y control.* Con el fin de ilustrar el grado de desviación entre el control de calidad y el diseño de las mezclas, se presentan en las Figuras 13 a 15 los criterios de diseño (polígono de vacíos) y los criterios de control de calidad, representando las regiones de control aceptables en el espacio establecido entre %Pb y Gmb para las mezclas. Este procedimiento es posible superponiendo el polígono de control sobre las superficies de respuesta y el polígono de vacíos, formado por los dos criterios más comunes para el control de calidad de compactación. El primero está basado en el nivel de densidad mínimo permitido respecto a la densidad de laboratorio, y el segundo es el nivel mínimo de densidad permitido de la densidad máxima teórica ($RICE\%, V_v = 0$). Además, los rangos típicos de variación aceptable para % Pb óptimos, han sido establecidos en $\pm 0.30\%$ y $\pm 0.45\%$.

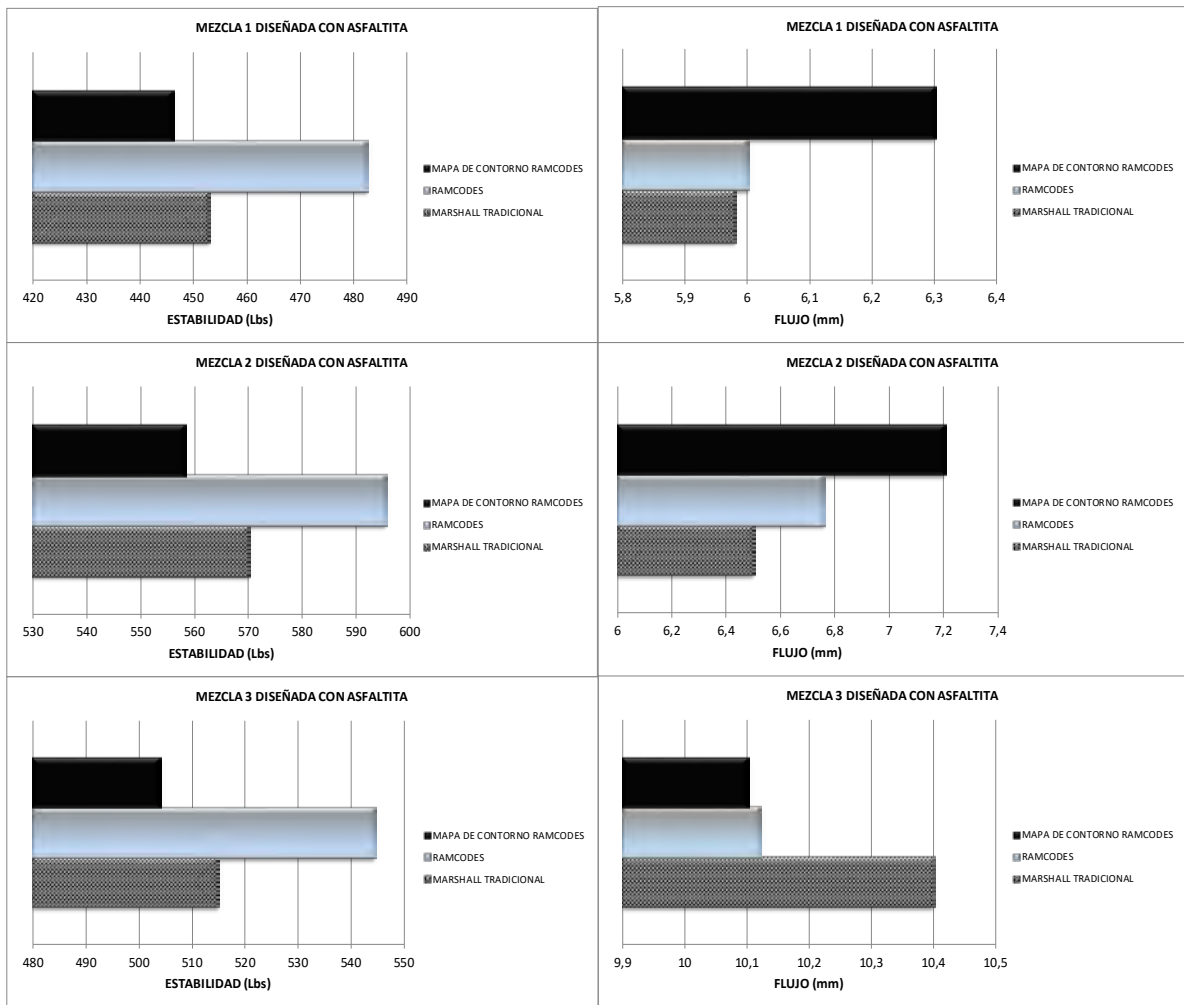


Figura 12. Comparación de los resultados obtenidos en laboratorio (Marshall y Ramcodes) con respecto a los mapas de respuesta para las mezclas diseñadas, 1 franja media, 2 franja fina y 3 franja gruesa

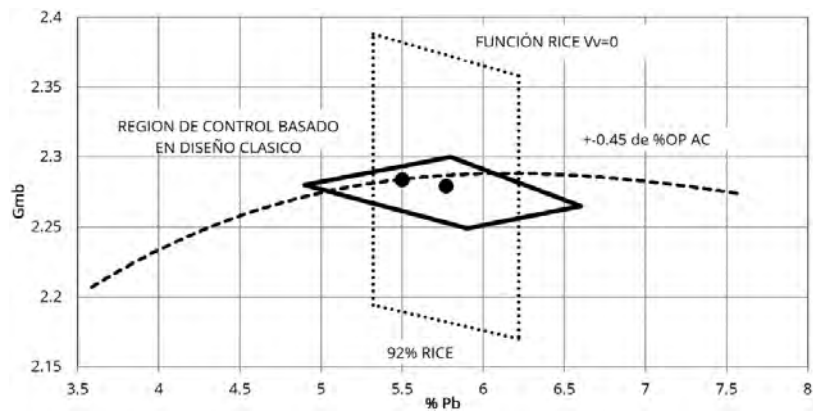


Figura 13. Comparación de los criterios de control de calidad y criterios de diseño para la mezcla de la franja central

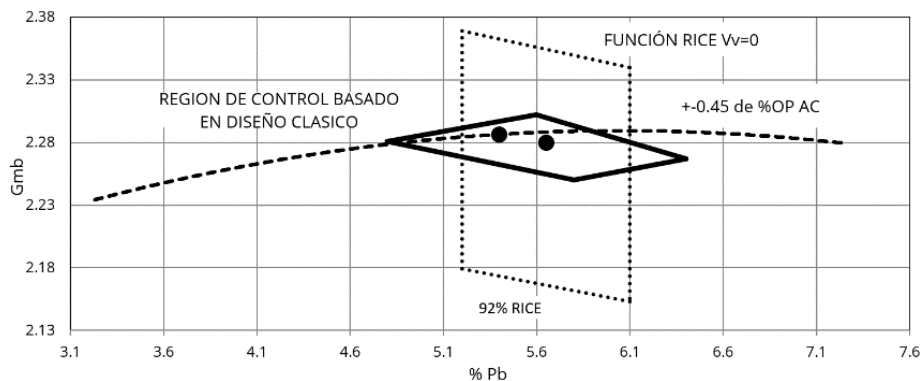


Figura 14. Comparación de los criterios de control de calidad y criterios de diseño para la mezcla de la franja inferior

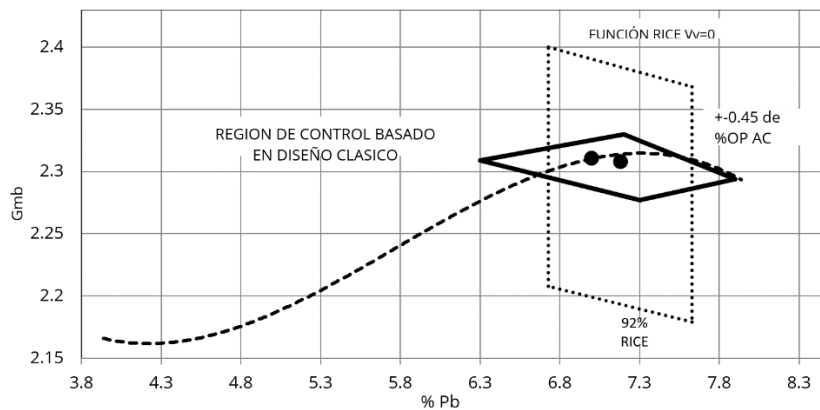


Figura 14. Comparación de los criterios de control de calidad y criterios de diseño para la mezcla de la franja inferior

Se puede observar que las tres mezclas cumplen con los criterios de diseño y control además de que se tiene un amplio margen de rangos tolerables dentro del polígono de control y las regiones máximas donde se cumplen las especificaciones para la aceptación de las mezclas de acuerdo al% de asfalto residual que oscila entre 5.2% y 7.63% en general para las tres mezclas.

- **Cálculo del módulo dinámico.** Se determinó el módulo dinámico de la mezcla diseñada en este estudio mediante la aplicación de varios métodos, se comparó con el módulo de una mezcla convencional, los resultados aparecen en la Tabla 7.

Tabla 7. Módulos dinámicos

Método	Módulo (Kg/cm ²)
Heukelom y Klomp	21,291
Bonnaure	22,055
Instituto del Asfalto	42,932
Witczak	30,057

El módulo dinámico de una mezcla convencional en frío MDF-19 referenciada a una temperatura de 20°C es 25.210 Kg/cm² [34].

- **Comparación económica.** Se realizó el análisis de precio unitario para la mezcla diseñada en este estudio y se comparó con el precio unitario de una mezcla densa en frío convencional, el resultado muestra que la mezcla fabricada con asfaltita presenta un valor inicial, menor al de la convencional en un 18%.

5. CONCLUSIONES

La mezcla diseñada con asfaltita cumple los criterios de diseño para una mezcla densa en frío usada en labores de bacheo, con excepción del flujo, el cual es más alto que el requerido, lo que indica una fricción interna posiblemente baja; esto puede ser debido al porcentaje de asfalto de diseño el cual es relativamente alto (5,5%), a las propiedades naturales de la asfaltita, además de la baja viscosidad del bitumen, por lo que la mezcla puede presentar ahuellamientos y deformaciones, por ello no se recomienda para carpeta de rodadura.

Las mezclas diseñadas en este estudio con la adición de asfaltita, presentaron un desarrollo alto de la estabilidad, generando que sean más rígidas y a su vez más frágiles debido a que su flujo también es mayor, llevando a pensar que tendrían un mejor comportamiento en climas cálidos.

El comportamiento de las mezclas diseñadas modificadas con asfaltita, pueden llegar a tener un mejor comportamiento que las mezclas convencionales, a un costo no muy alto y sin generar solicitudes o exigencias diferentes de fabricación de acuerdo a su proceso normal.

De acuerdo a las metodologías de diseño empleadas, las mezclas bituminosas con asfaltita, para la gradación del límite central de las especificaciones, presentarían un mejor desempeño a lo largo de su vida

útil debido a que tienen una relación más cercana con a las especificaciones de construcción de carreteras del INVÍAS 2013 para un nivel de tránsito uno (NT-1).

El costo unitario para la mezcla con asfaltita diseñada en el presente estudio, es inferior al costo unitario de una mezcla convencional, teniendo en cuenta solo los costos iniciales, es decir sin incluir el análisis del costo durante la vida útil de las mezclas, esto es posible gracias al bajo costo relativo de la asfaltita y su aporte en el asfalto residual.

Las mezclas diseñadas por las metodologías Marshall y RAMCODES, presentaron valores de estabilidad muy superior respecto al mínimo exigido por las especificaciones INVÍAS 2013 para mezclas MDF-19 (500 kg para un nivel de tránsito NT-1, para las granulometrías de los límites central y superior (570 y 515 kg para Marshall, 595,4 y 544,3 kg para RAMCODES) respectivamente, indicativo de un posible adecuado comportamiento en servicio.

De análisis estadístico realizado con los mapas de contorno, se observa similitud de los resultados obtenidos por las dos metodologías Marshall y RAMCODES, pues los datos de flujo y estabilidad no varían en más del 1 y el 4% respectivamente.

La dosificación granulométrica utilizada, 49% de agregado grueso y 51% de agregado fino (asfaltita), presenta resultados aceptables, sin embargo, se insta a ser muy cuidadosos en el procedimiento de campo para que no se presenten diferencias en este sentido, una vez que se sabe de la dificultad de obtener mezclas homogéneas como se facilita en laboratorio.

Se vislumbran beneficios al utilizar la metodología RAMCODES, respecto a la metodología Marshall, tales como menor tiempo, menores recursos y técnicos, una vez que se dispone de software de apoyo y se usa un menor número de briquetas para ensayar y obtener los parámetros de diseño.

REFERENCIAS

- [1] Caro S. y Caicedo B. (2017). Tecnologías para vías terciarias: perspectivas y experiencias desde la academia. *Revista de Ingeniería* 45, 12-21.
- [2] Alarcón I. (2014). Uso de la asfaltita para pavimentos en vías terciarias en Boyacá y Cundinamarca en la República de Colombia. Tesis de especialización. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
- [3] Peña E. (2017). Mejoramiento de vías secundarias y terciarias en Colombia con el uso de mezcla asfáltica natural en frío (Asfaltitas). Análisis, aplicaciones y casos exitoso. En Congreso Mexicano del Asfalto. México.
- [4] Bustamante B. et al. (2019). Análisis del uso y comportamiento de la asfaltita como base y sub-base granular en pavimentos. Tesis de pregrado. Universidad Piloto de Colombia.
- [5] Higuera C. et al. (2012). Caracterización de las asfaltitas de Pesca Boyacá - cantera Santa Teresa. *Revista Ingenio* 5(1).
- [6] Manrique R. (2013). Characterization and Design of Asphalt Mixtures with Asphaltites from Boyacá for Use in Low Traffic Volume Roads. *Journal of Physics* 466.
- [7] Ruíz J. et al. (2017). Estudio del comportamiento de asfaltos naturales en mezclas asfálticas fabricadas con asfalto AC-20 y granulometría MD-12. *L'esprit Ingénieur* 7(1).
- [8] Rondón H. y Reyes F. (2012). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con Asfaltita. *Revista de Ingeniería* 36, 12-19.
- [9] Themeli A. et al. (2017). Molecular structure evolution of asphaltite - Modified bitumens during ageing; Comparisons with Equivalent Petroleum Bitumens. *International Journal of Pavement Research and Technology* 10(1), 75-83.
- [10] Mantilla J. y Castañeda E. (2019). Assessment of simultaneous incorporation of crumb rubber and asphaltite in asphalt binders. *Revista DYNA* 86(208), 257-263.
- [11] Ruiz J. et al. (2015). Evaluación del comportamiento mecánico del asfalto natural a partir de muestras a temperatura ambiente provenientes de Caquetá, Colombia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación* 6(2), 43-52.
- [12] Gómez O. et al. (2018). Caracterización preliminar de las arenas asfálticas de Picacho, municipio de Pesca (Boyacá, Colombia). *Boletín de Geología* 40(2), 87-99.
- [13] Cruz D. y Salazar W. (2019). Estudio del desempeño mecánico de una mezcla asfáltica natural, proveniente de la mina de Pavas, en el departamento del Caquetá. Tesis de especialización. Universidad Católica de Colombia.

- [14] Rondón H. y Reyes F. (2009). Comportamiento de una mezcla densa en caliente elaborada con asfaltos modificados con asfaltita. *Tecno Lógicas* 22,141-161.
- [15] Yilmaz M. et al. (2011). Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials* 25(11), 4279-4286.
- [16] Santos D. y Luna R. (2012). Asfaltos naturales: La "Mapia" y "Asfaltita", alternativas de construcción en obras de infraestructura vial en el contrato ruta del sol tramo 1. Tesis de especialización. Universidad Pontificia Bolivariana.
- [17] Delgado M. et al. (2018). Influence of Fur Non-Conventional Additives on the Physical, Rheological and Thermal Properties of an Asphalt. *Revista Ingeniería e Investigación* 38(2), 18-26.
- [18] Anaya M. y Díaz A. (2011). Asfaltita sus posibilidades como combustible. En IX Congreso Cubano de Geología. Cuba.
- [19] INVIAS. (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Instituto Nacional de Vías. Colombia.
- [20] Ministerio de Infraestructura Fundación de Laboratorio Nacional de Vialidad Fundalanavial. (2003). Diseño de mezclas asfálticas en frío utilizando emulsiones asfálticas. Estados Unidos.
- [21] RAMCODES. (2009). Metodología de análisis y diseño de geomateriales compactados. Recuperado: <https://fdocumento.com/document/03manual-ramcodes-2009.html>
- [22] Jiménez M. et al. (2009). Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones. *Revista Infraestructura Vial* 11(21).
- [23] Reyes O. et al (2013). Caracterización mecánica de mezclas asfálticas en función del origen y gradación del agregado pétreo. *Revista Científica General José María Córdova* 11(12), 215-232.
- [24] Kaa B. (2016). Análisis de propiedades de mezclas asfálticas modificadas en Panamá. *Revista de Iniciación Científica* 2(1), 48-53.
- [25] Reyes O. y Camacho J. (2008). Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo* 23.
- [26] Yang W. et al. (2020). Effect of Superplasticizer and Wetting Agent on Volumetric and Mechanical Properties of Cold Recycled Mixture with Asphalt Emulsion. *Journal Advances in Materials Science and Engineering* 5, 1-11.
- [27] Gashi E. et al. (2017). A Review of aggregate and asphalt mixture specific gravity measurements and their impacts on asphalt mix design properties and mix acceptance. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science* 4(5).
- [28] Dash S. (2013). Effect of Mix Parameters on Performance and Design of Cold Mix Asphalt. Tesis de maestría. Department of Civil Engineering National Institute of Technology. India.
- [29] Al-Mosawe H. et al. (2015). Effect of aggregate gradation on the stiffness of asphalt mixtures. *The International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology* 16(2), 39-49.
- [30] Booth S. (2011). Evaluation of volumetric and mechanistic properties of asphalt mixtures: Laboratory vs. Field. Tesis de maestría. University of Central Florida. Florida.
- [31] Razzaq A. et al. (2018). Evaluating the effect of air voids and asphalt content on the mechanical properties of hma by adopting indirect tensile strength test. *International Journal of Engineering & Technology* 7(4), 530-535.
- [32] Chadboum B. et al. (1999). The effect of voids in mineral aggregate (VMA) on Hot-Mix Asphalt Pavements. Minnesota Department of Transportation. Estados Unidos.
- [33] Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. (2001). Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes. Guatemala.
- [34] Higuera C. et al. (2017). Análisis comparativo de una mezcla densa en caliente MDC-19 y una mezcla densa en frío MDF-19. *Revista Ingenio Magno* 8(1).

Efecto de los parámetros sobre el calor de entrada del proceso de soldadura por puntos de resistencia RSW en un acero ferrítico bainítico FB grado 700

Noé Ibarra Interrial¹

Rocío Saldaña Garcés²

Emmanuel José Gutiérrez Castañeda³

^{1,2}*Corporación Mexicana de Investigación en Materiales*

³*Instituto de Metalurgia de la UASLP*

México

Los aceros avanzados de alta resistencia AHSS se han desarrollado con el paso de los años debido a sus aplicaciones en automóviles, porque otorgan propiedades como buena relación resistencia-ductilidad. Dentro de esta clasificación se encuentran los aceros ferríticos bainíticos FB, que están compuestos por una fase suave (ferrita) y una fase dura (bainita). En este estudio se realizaron uniones por el proceso de soldadura por puntos de resistencia RSW en aceros FB grado 700 de 1,25 mm de espesor, variando la corriente en valores de 6, 9 y 12 kA, con tiempos de soldadura de 150, 300 y 450 ms, y fuerza de los electrodos de 4 kN. Se realizó una inspección visual para corroborar que los botones cumplieran con los estándares de profundidad de indentación, penetración y tamaño del botón establecidos por la AWS D8,1/D8,7, y se relacionaron los resultados con los calores de entrada determinados para cada muestra. Se llevó a cabo un análisis microestructural por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para verificar las diferentes zonas presentes en el botón de soldadura, así como relacionar las fases con los valores de dureza obtenidos.

¹ Magíster en Tecnología de la soldadura industrial.

Contacto: noe.ibarra@hotmail.com

² Doctora en Ingeniería metalúrgica y cerámica.

Contacto: rocio.saldana@comimsa.com

³ Doctora en Ingeniería metalúrgica y cerámica

Contacto: emmanuel.gutierrez@uaslp.mx

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de aceros avanzados de alta resistencia AHSS en la industria automotriz se ha ido desarrollando con la finalidad de fabricar vehículos más seguros, más ligeros y con un menor consumo energético (hasta un 5% con una reducción del 10% en el peso) [1]. Los aceros avanzados se dividen en 3 generaciones, las cuales se diferencian entre sí por su combinación de resistencia a la tensión y elongación, la primera generación está compuesta por aceros de plasticidad inducida por transformación TRIP, doble fase DP, fase compleja CP y martensíticos M, la segunda generación por aceros de plasticidad inducida por maclaje TWIP y aceros TRIP de alto manganeso y la tercera generación se encuentra en desarrollo, sin embargo, ya existen algunos aceros producidos en diversas investigaciones que cumplen con las características de aceros de tercera generación, tal como los aceros bainíticos libres de carburos CFB, de temple y partición Q&P y aceros TRIP [1-4].

Los aceros ferríticos bainíticos FB son considerados una variante de los aceros doble fase (ferrita + martensita), debido a que su microestructura consiste en una combinación de una fase suave (ferrita) y una fase dura (bainita), la única diferencia con los aceros DP, es que la fase dura es la bainita en lugar de la martensita [5].

Uno de los grandes retos de la industria automotriz, es el uso de los procesos de manufactura que se involucran en la fabricación de componentes finales elaborados con estos aceros, ya que, generalmente emplean procesos de arco, los cuales generan mucho calor para llevar a cabo la soldadura ocasionando mayor presencia de defectos en las uniones. Otro proceso de soldadura es el de puntos de resistencia RSW, el cual es de los más empleados para la unión de la carrocería debido a su rapidez y fácil automatización, sin embargo, debido a que el ciclo de soldadura involucra calentamientos y enfriamientos demasiado rápidos, la microestructura y propiedades mecánicas del metal usado pueden verse afectadas.

Los aceros FB son fabricados a través de un proceso muy controlado, estos materiales son calentados entre las líneas A1 y A3, es decir, una zona bifásica de ferrita y austenita, y posteriormente enfriados hasta la temperatura de transformación bainítica o enfriando lentamente en un proceso de rolado en caliente [6].

Para que la bainita se pueda formar, es necesario la adición de elementos que ayuden a evitar la precipitación de la cementita durante la transformación bainítica, así como elementos que ayuden a la estabilidad de la austenita y recorran m_s a temperaturas más bajas [7-9], es por esta razón que la soldabilidad de los aceros FB presenta un gran reto en la industria, ya que las temperaturas alcanzadas en el proceso de RSW pudieran eliminar el tratamiento térmico anterior y modificar las propiedades finales de los componentes.

Por lo anterior, la finalidad de este trabajo es realizar el análisis del efecto térmico-metalúrgico que producirá el proceso de soldadura RSW sobre la microestructura y propiedades mecánicas de los aceros FB, así como verificar que cumplan los estándares de calidad de la industria automotriz.

2. MÉTODO

2.1 Metal base

Se utilizó un acero FB grado 700 de 1,25 mm de espesor y se determinó su composición química con un equipo de espectroscopía de emisión óptica marca Oxford-Instruments-pmi Master Smart. Posteriormente se realizó la preparación metalográfica del metal base para su análisis microestructural. Las muestras se desbastaron con lijas de SiC con granulometrías de 80 a 800, posteriormente se pulieron con pasta de diamante de 1 μ m.

Una vez alcanzado el acabado espejo, las muestras fueron atacadas químicamente utilizando dos reactivos diferentes para observar cambios en los matices de las fases, el primero fue un ataque con nital al 2% durante 10 segundos y el segundo ataque se dividió en dos partes, la primera fue con picral al 2% durante

7 segundos mientras se añadían gotas de ácido clorhídrico HCl, se enjuagaron y atacaron nuevamente con metabisulfito de sodio durante 7 segundos. Adicionalmente, se realizaron pruebas de tensión en un equipo Tinus Olsen (30 ton.) sobre probetas subsize según la norma ASTM E8 [10], para corroborar el grado del acero, de igual manera se determinó la dureza del material utilizando un micro durómetro Wilson Hardness-Tukon 2500 con una carga de 500 gf.

2.2 Soldaduras por puntos de resistencia RSW

Con ayuda de la composición química, se calculó la resistencia eléctrica del material, tomando en cuenta las características del electrodo empleado en el equipo de RSW (Área = 17,8 mm²) y la resistividad eléctrica, la cual fue obtenida con ayuda del software Jmatpro (0,4x10⁻⁶ Ω*m). Dando como resultado una resistencia eléctrica de 2,81x10⁻⁵ Ω, la cual se utilizó para determinar los valores de calor de entrada para cada combinación de parámetros.

Las soldaduras se realizaron sobre dos láminas unidas a traslape utilizando un equipo FANUC Robot R-2000 165F de corriente alterna con una fuente de 50 Hz, los parámetros que se variaron fueron la corriente y el tiempo de soldadura, manteniendo constante la fuerza de los electrodos, el tiempo de compresión y el tiempo de retención. Tales parámetros se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de soldadura RSW

Prueba	Corriente (kA)	Tiempo soldadura (ms)	Fuerza electrodos (kN)	Tiempo compresión (ms)	Tiempo retención (ms)
1	6	150			
2	9	300			
3	12	450			
4	6	300			
5	9	450	4	550	300
6	12	150			
7	6	450			
8	9	150			
9	12	300			

Una vez obtenidos los botones de soldadura, se realizó una inspección macroestructural con ayuda de un estereoscopio NIKON SMZ 754T, esto para evaluar la profundidad de indentación, el tamaño del botón y la penetración conforme a la práctica recomendada AWS D8,1 y D8,7 para la evaluación de la calidad de las soldaduras por puntos de resistencia. Para llevar a cabo el análisis microestructural, se utilizó un microscopio óptico Nikon Eclipse MA200 y un microscopio electrónico de barrido Tescan Mira 3, para identificar las fases presentes en cada una de las zonas del botón de soldadura, al igual que los cambios en morfología en cada una de ellas. Posteriormente se midió la dureza haciendo un perfil de 20 indentaciones en diagonal, abarcando todas las zonas, tal como se muestra en la Figura 1.

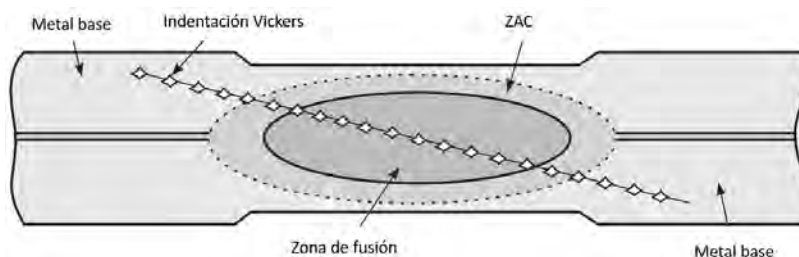


Figura 1. Esquema de dureza en soldadura RSW [11]

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización del metal base

- *Composición química.* La composición química del acero FB 700 se muestra en la Tabla 2, en donde se puede observar alto contenido en elementos como Mn y Ni, los cuales al ser elementos gammágenos,

recorren la línea de inicio de transformación martensítica a temperaturas más bajas, haciendo que éstos aceros tengan un rango más amplio para poder formar bainita, además de también incorporar elementos como aluminio y silicio, los cuales son de vital importancia para la fabricación de aceros FB, ya que éstos inhiben la formación de cementita durante los procesos de transformación bainítica. Sin embargo, algunos autores mencionan la importancia de cuidar los porcentajes de silicio y aluminio, debido a que la adición en grandes cantidades puede repercutir en problemas de adhesión en procesos de galvanizado y el deterioro de las propiedades mecánicas [12-14].

Tabla 2. Composición química del metal base FB 700 (% e.p.)

C	Mo	Co	Ti	Si	Ni	W
0,071	0,321	0,017	0,006	0,634	0,426	0,006
Cu	V	Mn	Cr	Al	Nb	Fe
0,255	0,004	1,74	0,510	0,651	0,041	Bal.

- *Propiedades mecánicas.* Para determinar el grado del acero y su generación, se realizó un ensayo de tensión sobre 3 muestras subsize determinando su resistencia última a la tensión UTS, su elongación total y el producto de ambas, ya que como mencionan algunos autores, la generación del acero está en función del producto de la resistencia última a la tensión por la elongación total [15]. Con los valores de fuerza y desplazamiento obtenidos de la prueba de tensión, se calculó la curva esfuerzo deformación (Figura 2) para determinar el grado del acero y la generación a la que corresponde.

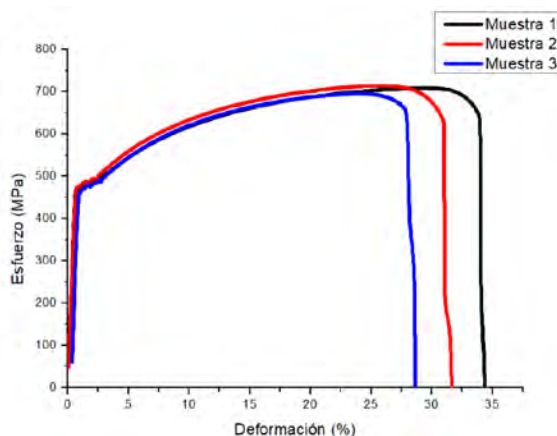


Figura 2. Curva esfuerzo vs deformación del metal base FB 700

Los valores en promedio del UTS y de la elongación total fueron de 706 MPa y 31% respectivamente, considerándose por algunos autores un acero de tercera generación ya que su producto de UTS (GPa) * TE (%) exceden del 20 propuesto para definir a los aceros de tercera generación. Sin embargo, el acero se encuentra en la interfaz de los AHSS de primera y los de tercera generación, tal como se muestra en la Figura 3, pero debido a su UTS relativamente bajo se puede decir que se asemeja más con las características de los aceros de primera generación.

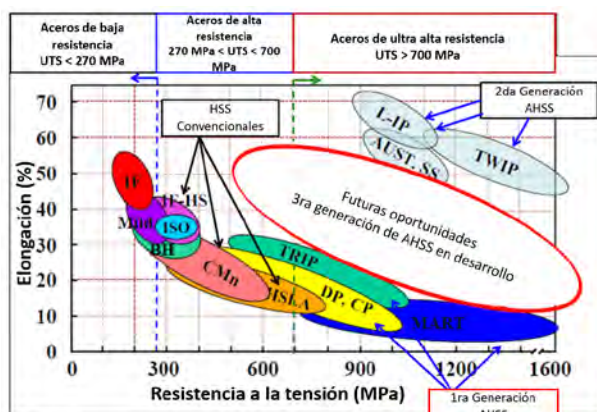


Figura 3. Diagrama de la banana de aceros avanzados de alta resistencia [16]

Por otro lado, se determinó la dureza del material base para observar las variaciones con respecto a las diferentes zonas que se pudieran presentar después del proceso de soldadura. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 4, donde se obtuvo un promedio de dureza de 229,2 HV, la cual se atribuye principalmente a la ferrita la cual es una fase suave.

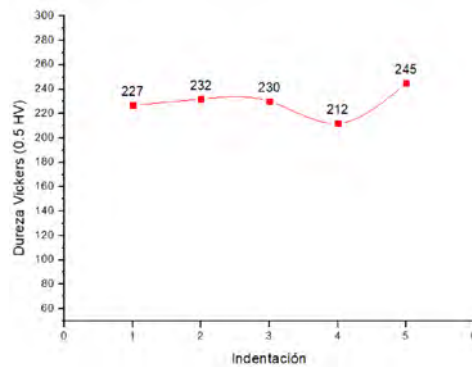


Figura 4. Dureza Vickers del metal base

- *Análisis microestructural.* En la Figura 5-a se muestra la microestructura del metal base atacado con nital al 5%, en la cual se observa una matriz clara correspondiente a la ferrita y granos oscuros en forma de red identificados como bainita. Para descartar la presencia de martensita se realizó un ataque múltiple mencionado anteriormente en el punto 2,1, esto para observar las diferencias entre los contrastes de las fases con cada reactivo. Estos reactivos tiñen la ferrita de color café claro, la bainita color negro y la martensita/austenita de color blanco, como se observa en la Figura 5-b solo existe la presencia de ferrita y bainita.

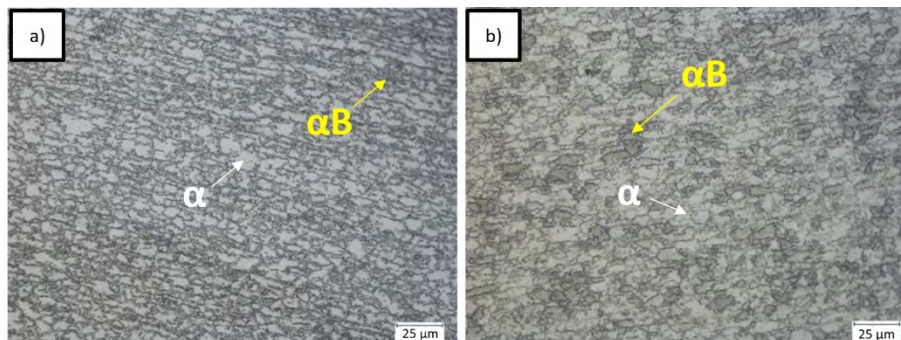


Figura 5. Metal base acero FB 700, a) 500X, Nital 2% - 9 s, b) 500X, Picral 2% - 7 s, Metabisulfito de sodio - 15 s con gotitas de HCl

Igualmente, se realizó un análisis con ayuda del microscopio electrónico de barrido, para observar si existían algunas fases más finas como precipitados o carburos que no se pudieran llegar a observar en el microscopio óptico. En la Figura 6 se muestra la micrografía tomada del MEB a 4kX, donde se puede observar una matriz ferrítica y granos con relieves dentro correspondientes a la bainita, confirmando la ausencia de alguna fase secundaria.

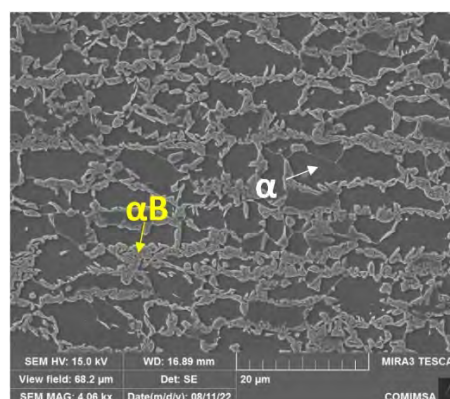


Figura 6. Micrografía obtenida por MEB a 4kX del metal base, se observan granos de bainita y una matriz ferrítica

3.2 Análisis de uniones por puntos de resistencia RSW

3.2.1 Calor de entrada

Antes de realizar las uniones, se calcularon los calores de entrada para cada combinación de parámetros de la Tabla 1, esto para comparar los resultados de la evaluación macroestructural y asociar los posibles cambios a los diferentes aportes de calor para cada muestra. Debido a que el proceso RSW genera calor gracias al efecto Joule, el calor de entrada se determina por la ecuación (1). Los valores de calores de entrada para cada unión se muestran en la Tabla 3.

$$Q = I^2 t R \quad (1)$$

Donde:

Q = Calor de entrada, Joules

I = Corriente, Ampere

t = Tiempo de soldadura, segundos

R = Resistencia eléctrica

Tabla 3. Calores de entrada calculados para cada combinación de parámetros.

Muestra	Corriente (kA)	Tiempo (s)	Resistencia eléctrica (Ω)	Calor de entrada (J)
1	6	0,15		152
2	9	0,3		683
3	12	0,45		1821
4	6	0,3		303
5	9	0,45	$2,81 \times 10^{-5}$	1024
6	12	0,15		607
7	6	0,45		455
8	9	0,15		341
9	12	0,3		1214

3.2.2 Análisis macroestructural

Realizadas las uniones, se procedió a su preparación metalográfica para la evaluación del tamaño de botón, profundidad de indentación y penetración, de acuerdo con la AWS D8,1 y D8,7 [11, 17] (Tabla 4), además de realizar una inspección visual para descartar la posible presencia de defectos como, falta de fusión, porosidad y expulsión del metal.

Tabla 4. Requerimientos de tamaño de botón, profundidad de indentación y penetración establecidos por la AWS D8,1/D8,7 [11, 17]

Tamaño del botón	Profundidad de indentación	Penetración
Mínimo $4 * \sqrt{t}$ t = Espesor de la placa = 1,25 mm Tamaño del botón $\geq 4,47$ mm	Máximo 30%	Mínimo 20%

En la Figura 7, se puede observar que la muestra 3 experimentó una expulsión excesiva del metal, la cual se debe a que es el parámetro con los niveles de corriente y tiempo más altos, lo que ocasiona una entrada de calor muy elevada (1821 J). Por otro lado, la muestra número 1 experimentó una falta de fusión, por lo que se puede observar la línea de división entre las dos láminas a lo largo de la zona del botón. Esto se asocia a que los niveles de corriente y tiempo eran los más bajos, generando un calor de entrada insuficiente (152 J) para poder fundir por completo las dos láminas.

Las muestras 4 y 7 son las que presentaron una mejor apariencia sin expulsión del metal, esto porque se puede apreciar que no hubo contacto de la zona de fusión con los electrodos, lo cual indica que el calor de entrada para producir uniones de buen aspecto visual se encuentra entre 300 y 450 J. Para el resto de los parámetros no se observó una mayor expulsión del metal como en el parámetro 3, sin embargo, la apariencia superficial muestra que sí hubo expulsión o contacto de la zona de fusión con los electrodos, ocasionando una apariencia áspera en la superficie.

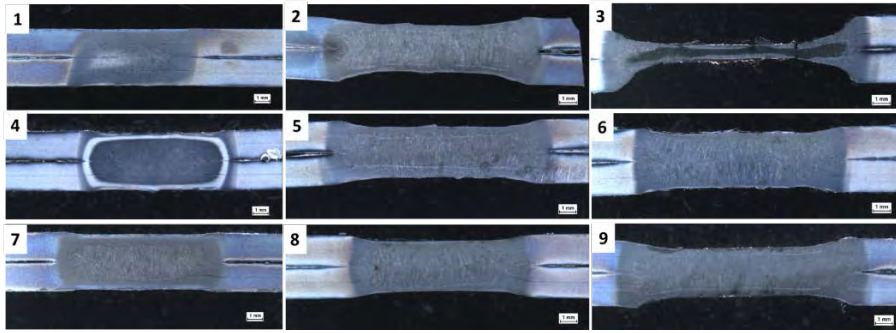


Figura 7. Macrográficas de uniones mediante RSW, 1) 6 kA/150 ms, 2) 9 kA/300 ms, 3) 12 kA/450 ms, 4) 6 kA/ 300 ms, 5) 9 kA/ 450 ms, 6) 12 kA/150 ms, 7) 6 kA/450 ms, 8) 9 kA/150 ms y 9) 12 kA/ 300 Ms

Una vez realizada la inspección visual, se tomaron medidas de penetración, profundidad de indentación, tamaño de botón y zona afectada por el calor (Figura 8, Tabla 5), para verificar si cumplían con los estándares de calidad de la AWS D8,1 y D8,7. Para el caso de la penetración, todas las uniones cumplieron con el 20% mínimo establecido, sin embargo, en el caso de la profundidad de indentación los botones 2 y 9 excedieron ligeramente el 30% permitido y el botón 3 al tener una entrada de calor muy elevada retribuida a una corriente y tiempo de soldadura altos, la profundidad de indentación llegó hasta el 76%. Para el caso del tamaño de botón, la muestra 1 no cumplió con el tamaño mínimo como era de esperarse, esto debido a los niveles de corriente y tiempo bajos que provocaron una entrada de calor insuficiente, lo que ocasionó una falta de fusión y, por ende, un botón demasiado pequeño.

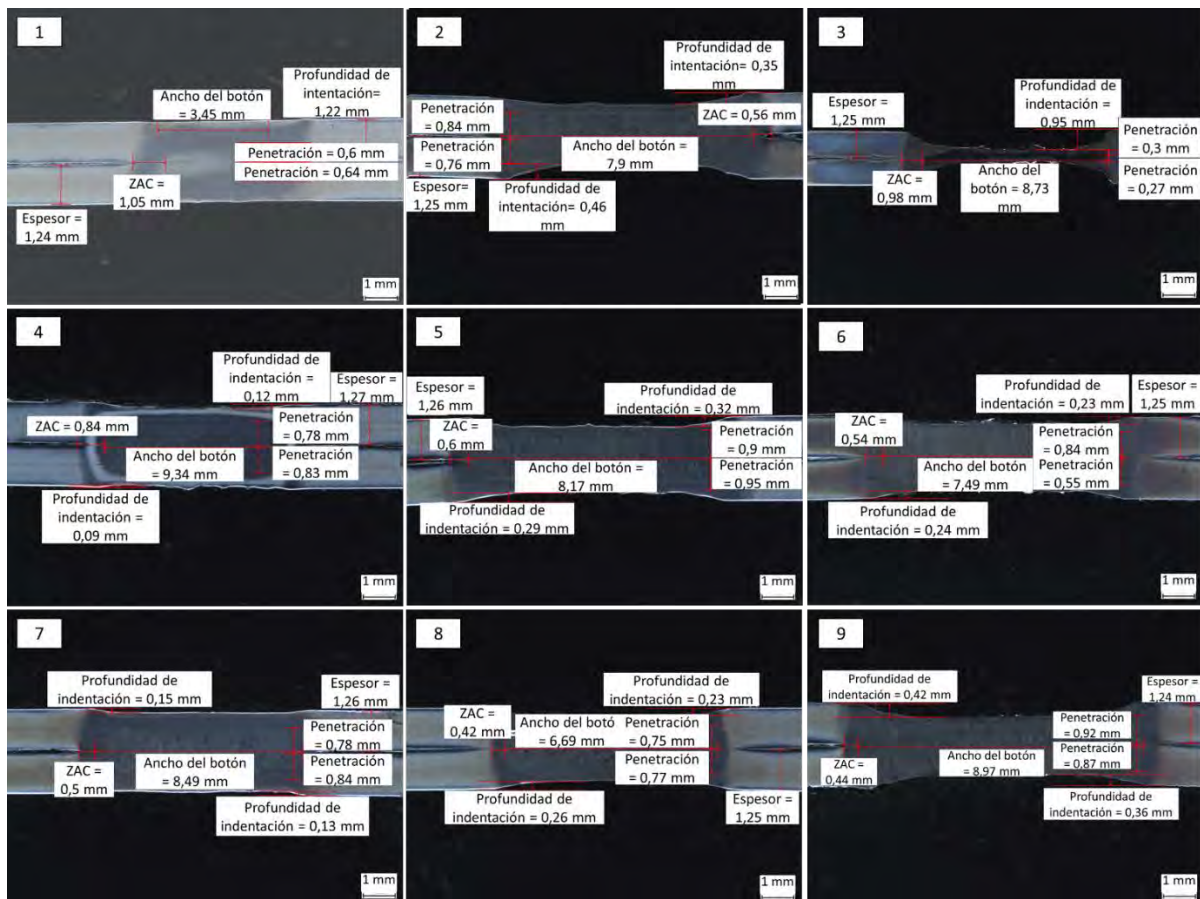


Figura 8. Macrográficas de uniones mediante RSW con medidas, 1) 6 kA/150 ms, 2) 9 kA/300 ms, 3) 12 kA/450 ms, 4) 6 kA/ 300 ms, 5) 9 kA/ 450 ms, 6) 12 kA/150 ms, 7) 6 kA/450 ms, 8) 9 Ka/150 ms y 9) 12 KA/ 300 Ms

Los botones 4, 5, 6, 7 y 8 cumplieron con los criterios de calidad, sin embargo, los botones 5, 6 y 8 como se había mencionado anteriormente, tienen una apariencia áspera en la superficie debido al contacto de los electrodos con la zona de fusión provocado por una expulsión leve del metal. En el caso de los botones 4 y 7, además de cumplir con todos los criterios de calidad, contaban con buen aspecto visual, ya que no se encontró expulsión del metal ni falta de fusión.

Tabla 5. Valores obtenidos de tamaño de botón, profundidad de indentación, penetración y ZAC

Muestra	Tamaño de botón (mm) (> 4,47 mm)	Prof. de indentación (%) (< 30%)	Penetración (%) (> 20%)	ZAC (mm)	Observaciones
1	3,46	0	49,1	1,05	Falta de fusión
2	7,90	32,2	63,8	0,56	Expulsión leve
3	8,72	76	23	0,98	Expulsión excesiva
4	5,30	8,3	63	0,84	Buen aspecto visual
5	8,12	24,3	73,3	0,60	Expulsión leve
6	7,50	18,7	68	0,54	Expulsión leve
7	6,49	10,9	64,2	0,50	Buen aspecto visual
8	6,69	19,4	61	0,42	Expulsión leve
9	8,97	31,2	72,1	0,44	Expulsión leve

Posteriormente, se compararon los valores de calor de entrada con cada variable de la Tabla 5, esto para observar cuál era el comportamiento de cada una de ellas respecto al calor aportado (Figura 9).

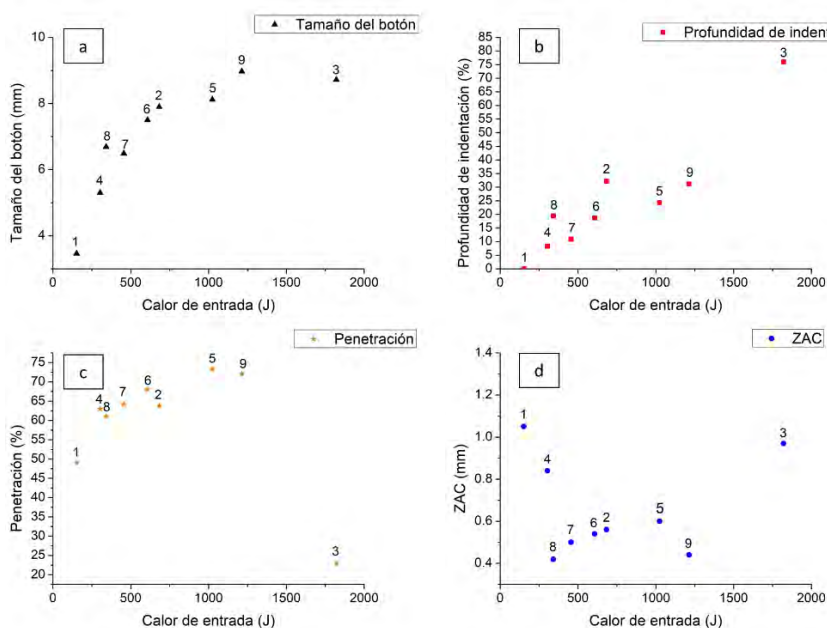


Figura 9. Gráfica de calor de entrada vs; a) tamaño de botón, b) profundidad de indentación, c) penetración y d) Zona afectada por el calor (ZAC)

En la Figura 9-a se observa que a mayor calor de entrada el tamaño de botón aumenta, debido a que la zona de fusión producida también es mayor, sin embargo, llega un punto donde los valores se mantienen casi constantes, debido a que el tamaño de los electrodos ya no permite producir un ancho de la zona de fusión mayor y se empieza a producir la expulsión del metal, tal como se muestra con el botón 9 (1214 J) y 3 (1821 J).

Para el caso de la profundidad de indentación ocurre algo similar, conforme mayor es el calor de entrada, se produce una zona de fusión más grande lo que hace que los electrodos penetren más sobre la superficie, es por ello que se observa que la profundidad de indentación incrementa, Figura 9-b.

En la Figura 9-c se muestra cómo la penetración varía en función del calor de entrada, la cual va incrementando cuanto mayor es el calor de entrada, pero se llega un punto donde empieza a disminuir nuevamente, esta disminución se debe a una reducción en la sección transversal provocada por la expulsión del metal. En la zona afectada por el calor no se observó algún comportamiento dependiente del calor de entrada, esto quiere decir que puede haber otra variable que influye en su comportamiento (Figura 9-d).

3.2.3 Análisis microestructural

El análisis microestructural fue llevado a cabo mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para definir las fases en cada zona. Las zonas encontradas para cada botón de soldadura eran

prácticamente iguales, por lo que solo se colocaron imágenes de la muestra más representativa (Figura 10). El botón está compuesto por 6 zonas principalmente; la zona de fusión ZF la cual presenta granos ferríticos en forma de agujas y martensíticos, orientados en dirección del flujo de calor, es decir, en dirección de los electrodos, ya que éstos son refrigerados por agua produciendo un enfriamiento muy rápido promoviendo la formación de estructuras columnares martensíticas.

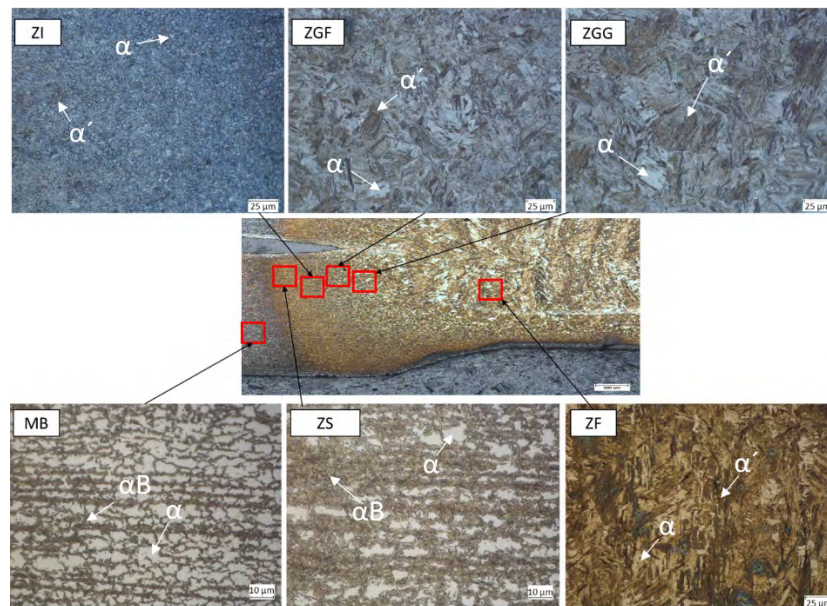


Figura 10. Microestructuras obtenidas de las diferentes zonas del botón unido por el proceso RSW

Posteriormente, dentro de la ZAC se observaron diferentes zonas; la zona afectada de grano grueso ZGG la cual consiste de ferrita en pequeñas cantidades y granos martensíticos, pero ya no con una orientación preferencial, esto atribuido a que no se produce fusión en esta zona, por eso no existe una solidificación preferencial como era el caso de la zona de fusión.

Después se encuentra la zona afectada de grano fino ZGF donde se puede observar ferrita en mayor cantidad que la ZGG y martensita más fina, esto debido a que posiblemente la temperatura alcanzada sea ligeramente superior a A_3 dando muy poco tiempo para que la ferrita se descomponga en austenita y que ésta creciera como era el caso de la ZGG, dando como resultado una estructura más fina y con más ferrita.

Seguido de la ZGG y la ZFG se encontró una zona denominada zona intercrítica ZI, donde su microestructura consiste en granos muy finos de martensita y ferrita, se le nombra así, ya que la temperatura alcanzada se encuentra entre la línea A_1 y A_3 , es decir, en una zona bifásica de austenita y ferrita y gracias al rápido enfriamiento y la baja temperatura hay muy poca difusión produciendo estas estructuras muy finas.

Mas adelante entre la ZI y el metal base (MB) se encontró una zona nombrada zona subcrítica ZS, en esta zona se produjo un crecimiento de la bainita y ferrita del metal base, sin haber transformación, ya que la temperatura alcanzada está por debajo de A_1 produciendo solamente el engrosamiento del grano. Por último, se localiza el metal base, el cual como ya se explicó anteriormente consiste de ferrita y bainita solamente.

Después del análisis con el microscopio óptico, se tomaron imágenes a mayor magnificación con el microscopio electrónico de barrido para corroborar los resultados obtenidos anteriormente y descartar la existencia de fases secundarias, Figura 11.

De las imágenes obtenidas se pudo observar que no existen fases secundarias en la microestructura y consisten principalmente en estructuras martensíticas y ferríticas en forma de aguja para la ZF, ZGG y ZGF. Para la ZI se encontró martensita y pequeños puntos blancos correspondientes a granos de ferrita muy finos y, por último, para la ZS y el metal base se observó la misma microestructura solamente con un engrosamiento de grano de la ZS debido a la temperatura alcanzada.

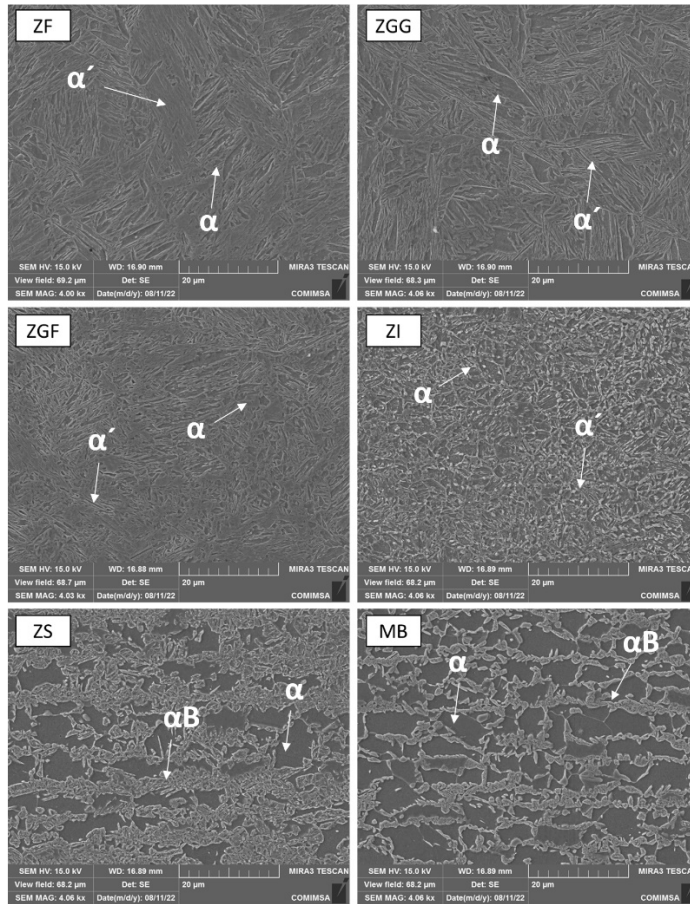


Figura 11. Fotomicrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido a 4000X de la ZF, ZGG, ZGF, ZI, ZS y MB.

3.2.4 Ensayo de dureza

Después de realizar el análisis macro y microestructural, se evaluó la microdureza de los botones de soldadura haciendo un perfil de 20 indentaciones en diagonal, tal como se describió anteriormente. Los valores obtenidos se promediaron y se graficaron por zona para observar si existía alguna diferencia entre cada botón (Figura 12).

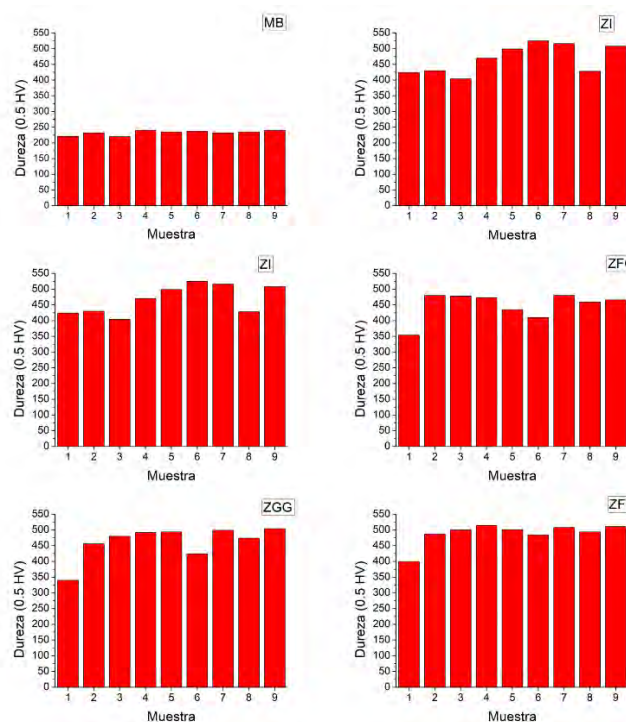


Figura 12. Gráficas de microdureza Vickers por zona de soldadura; MB, ZS, ZI, ZFG, ZGG y ZF

Para la zona subcrítica se observó que todas las muestras tenían el mismo comportamiento, durezas de 310 Vickers aproximadamente, este incremento respecto al material base se atribuye a un crecimiento de las fases (bainita y ferrita), en el caso de la zona intercrítica no se encontró alguna diferencia clara entre los valores de dureza de cada muestra, ya que todos oscilaban entre 430 y 500 Vickers, sin embargo, se observó que los valores de esta zona eran igual o superior a los de la ZF, esto debido principalmente a la elevada cantidad de martensita y su morfología demasiado fina.

Tanto para la ZFG y la ZGG se pudo observar que la muestra número 1 presenta durezas de hasta 100 Vickers por debajo de los otros botones, esto como consecuencia de la falta de fusión, ya que, la cantidad de martensita en estas zonas era menor, provocando una disminución de la dureza. Igualmente, para estas zonas los valores de dureza alcanzados se asemejan a los de la zona de fusión, por lo que se puede decir que la morfología columnar y equiaxial no jugaron un papel importante sobre esta propiedad, pero si la cantidad de fases.

Por último, se muestra la zona de fusión donde al igual que la ZFG y la ZGG solo se observa un cambio en el botón 1 por la falta de fusión y la menor cantidad de martensita presente. Por lo anterior se puede decir que, la dureza de estos aceros depende del calor de entrada solo cuando existe falta de fusión, es decir calores menores a 160 J, sin embargo, para calores mayores se observa que la dureza no cambia, debido a que no existen variaciones en las fases presentes.

4. CONCLUSIONES

De la inspección visual realizada se concluyó que, a valores de calor de entrada mayores a 650 J la calidad de las uniones se ve comprometida, ya que la profundidad de indentación excede el 30% permitido por la AWS D8,1/D8,7. Por otro lado, se observó que calores de entrada bajos (150 J), el tamaño de botón es demasiado pequeño y no cumple con el mínimo establecido por la AWS ($\geq 4,47$ mm) produciendo una zona afectada por el calor muy grande (1,02 mm) y una zona de fusión relativamente pequeña y no homogénea (3,46 mm). Para el caso de la penetración se observó que conforme aumenta el calor de entrada la penetración aumenta, hasta llegar a un punto donde empieza a disminuir debido a la reducción de la sección transversal provocada por la expulsión del metal.

Por lo anterior, los calores de entrada para producir uniones de láminas de acero FB grado 700 de 1,25 mm de espesor con buen aspecto superficial y que cumplan los estándares de calidad de la AWS D8,1/D8,7 se encuentran en el rango de 300 a 500 J, de las cuales las muestras 4 y 7 fueron las de mejores cumpliendo con los estándares establecidos.

En el caso del análisis microestructural no se observó un cambio significativo en las fases presentes entre cada botón, ya que en todos se encontraron las mismas zonas; zona de fusión ZF, zona afectada de grano grueso ZGG, zona afectada de grano fino ZFG, zona intercrítica ZI, zona subcrítica ZS y metal base MB. De las zonas encontradas se observó que la ZF se conformaba principalmente de granos martensíticos columnares orientados en dirección del flujo de calor, para la ZGG y la ZFG las estructuras se conformaban por martensita equiaxial y cantidades pequeñas de ferrita, la ZI constaba de una mezcla muy fina de martensita y ferrita y la ZS consistía en una mezcla de bainita y ferrita con tamaños de grano más grandes respecto al metal base.

Durante la medición de la dureza se observó que para la muestra 1 hubo un decremento significativo en la zona de fusión y en la ZGG y ZFG, ya que la cantidad de martensita respecto a los otros botones era menor debido a la falta de fusión. Para el resto de botones no se encontró una diferencia considerable entre los valores de dureza, queriendo decir que el calor de entrada influye en los valores de dureza solamente cuando existe falta de fusión.

REFERENCIAS

- [1] Matlock D. y Speer J. (2010). Processing opportunities for new advanced high-strength sheet steels. *Materials and manufacturing processes* 25, 7-13.

- [2] Barajas N. et al. (2016). Tendencia de los aceros y su aplicación en la industria automotriz. *Ciencia cierta* 48, 14.
- [3] Jeon W. et al. (2020). Liquid metal embrittlement of galvanized TRIP steels in resistance spot welding. *Metals* 10, 787.
- [4] Grajcar A. et al. (2012). Third generation of AHSS with increased fraction of retained austenite for the automotive industry. *Archives of civil and mechanical engineering* 12, 334-341.
- [5] Hilditch T. et al. (2015), Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS). En Shome M. y Tumuluru M. (Eds.), *Welding and joining of advanced high strength steels (AHSS)*. Woodhead.
- [6] Karimi M. y Kheirandish S. (2009). Comparison of work hardening behaviour of ferritic-bainitic and ferritic-martensitic dual phase steels. *Steel research international* 80 (2), 160-164.
- [7] Lim N. et al. (2012). Effects of aluminum on the microstructure and phase transformation of TRIP steels. *Metals and materials international* 18 (4), 647-654.
- [8] Van Slycken J. et al. (2007). The effect of silicon, aluminium and phosphor on the dynamic behaviour and phenomenological modelling of multiphase TRIP steels. *Metals and materials international* 13(2), 93-101.
- [9] Smith A. et al. (2019). The effect of Niobium on Austenite Evolution during Hot Rolling of Advanced High Strength Steel. En 7th international conference on recrystallization and grain growth. Ghent, Belgium.
- [10] ASTM International (2010). ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1. *ASTM international* 1, 1-27.
- [11] AWS (2007). Specification for automotive weld quality resistance spot welding of steel D8.1M:2007. American welding society 1, 1-28.
- [12] El-Sherbiny A. et al. (2020). Replacement of silicon by aluminum with the aid of vanadium for galvanized TRIP steel. *Journal of materials research and technology* 9(3), 3578-3589.
- [13] Zeng Z. et al. (2020). Microstructure and mechanical properties of Nb and Ti microalloyed lightweight δ -TRIP steel. *Materials characterization* 164.
- [14] Yi H. et al. (2012). A novel design: Partitioning achieved by quenching and tempering (Q-T & P) in an aluminium-added low-density steel. *Scripta materialia* 68(6), 370-374.
- [15] Hance B. (2018). Advanced High-Strength Steel (AHSS) Performance Level Definitions and Targets. *Journal of materials and manufacturing* 11(4), 505-516.
- [16] Cora Ö. y Koç M. (2014). Promises and Problems of Ultra/Advanced High Strength Steel (U/AHSS) Utilization in Automotive Industry. En 7th automotive technologies congress (OTEKON 2014). Bursa, Turkey.
- [17] AWS (2005). D8.7M Recommended Practices for Automotive Weld Quality- Resistance Spot Welding. American welding society, 3-5.

Descripción y recomendaciones para la durabilidad de la construcción indígena *la maloca* en la Amazonía colombiana

Gabriel D. Zambrano-López¹

Carlos A. Gaviria-Mendoza²

Ana Milena Molina³

Emilmar Sulamit Rodríguez-Caldera⁴

Universidad Militar Nueva Granada

Colombia

La vivienda tradicional en los pueblos indígenas reviste un carácter fundamental para la vida y se extiende más allá de un refugio o sitio de descanso, porque hace parte de las relaciones sociales, de poder, gobernanza y las prácticas espirituales/medicinales propias de su cultura. Implementar un control de los materiales desde su obtención, tratamiento y empleo en la construcción podría beneficiar a la durabilidad del tipo de vivienda *la maloca* en la etnia Ticuna, que hacen parte del turismo cultural que se desarrolla en la Amazonía colombiana. Aunque se han realizado diferentes estudios e investigaciones acerca de *la maloca*, no se cuenta con una descripción de su construcción con enfoque de mejorar las prácticas constructivas para la zona, a fin de reducir el impacto ambiental generado por la tala de árboles y hoja de palma. En este estudio se presenta una descripción que abarca los procesos constructivos que se llevan a cabo y recomendaciones para brindar una mayor durabilidad de la madera. Este proceso se realiza a partir de una revisión de la literatura e información recopilada en la interacción directa con la comunidad, durante las salidas de campo en la población de Puerto Nariño, Amazonas, Colombia. Como resultado se tiene un avance en una serie de recomendaciones que serán socializadas para generar apropiación en la comunidad y en miras a su implementación monitoreada en los siguientes años.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil.

Contacto: est.gabriel.zambrano@unimilitar.edu.co

² Ingeniero Civil y Magíster en Ingeniería.

Contacto: carlos.gaviria@unimilitar.edu.co

³ Profesional en Relaciones Internacionales y Estudiante de Doctorado en Derecho Ambiental.

Contacto: ana.molina@unimilitar.edu.co

⁴ Licenciada en Estudios Internacionales y Magíster en Relaciones Internacionales.

Contacto: emilma.rodriguez@unimilitar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia y los países que comparten la Amazonía se han estado realizando diferentes estudios e investigaciones acerca de las viviendas de las tribus indígenas que allí habitan, la maloca ha sido estudiada desde diferentes puntos de vista y uno de los más importantes ha sido resaltar la particularidad de dichas viviendas [1] y su importancia para los indígenas [2] pero también, son significativas las investigaciones que se han realizado en cuanto a los materiales y procesos constructivos [3].

La construcción de la maloca son procesos ancestrales que fueron heredados por los antepasados indígenas, North [1] ha encontrado que los materiales y procesos empleados son muy parecidos entre las diferentes tribus amazónica y que los materiales son en su mayoría vegetales a los cuales pueden acceder en las mismas zonas donde viven. Algunos estudios se han encargado de establecer pautas o lineamientos acerca del proceso constructivo de estas viviendas además que descripciones detalladas de los materiales utilizados con el objetivo de tecnificarlo, identificando cada uno de los pasos para la ejecución de la obra y caracterizando cada material utilizado.

Varios autores han tratado de describir detalladamente los tipos de materiales y las diferentes especies empleadas dependiendo la tribu. También algunas afectaciones que pueden sufrir estos materiales cuando ya esté construida la maloca y puedan afectar la estabilidad, el servicio, la estética, la durabilidad de esta, generando algunas afectaciones [4].

La región amazónica sigue siendo objeto de muchas preocupaciones, que van desde el proteccionismo absoluto hasta una transformación a gran escala del ecosistema para la agricultura, la ganadería o la producción en general [5]. En cuanto a la actividad maderera (Figura 1), actualmente se emiten licencias que exigen el pago de impuestos en beneficio de la población, y existen restricciones sobre el tipo de madera que se busca comercializar.



Figura 1. Zona de extracción de madera para la maloca

Por otra parte, no se ha cuantificado las consecuencias de la extracción maderera ilegal y además no se tiene una línea base bien establecida debido al acceso limitado que se tiene a algunas comunidades, sumado al limitado número de estudios previos y reducida representatividad del estado. Con el crecimiento de la población, sobre todo en los centros poblados, disminuyen los recursos disponibles, sobre todo la madera, que se valora por su idoneidad para la construcción [6].

Debido a factores como el incremento de la población y el desplazamiento en algunas zonas se ha determinado que existe sobre explotación de la hoja de palma en la Amazonía colombiana. En [7] se indica que no existen programas económicos que controlen la explotación del recurso y la gran utilización que se le da a este material desde siempre, lo hacen notar como recurso natural en peligro. Además, el Amazonas ha venido sufriendo un proceso de evangelización que hace perder algunos aspectos y conocimiento de conservación que poseen los aborígenes, por ello pueden resultar afectados materiales como la palma porque ya no se le da el mismo tratamiento y usos [8].

En particular, la maloca sufre cambios relativamente frecuentes debido a los procesos de construcción y deconstrucción, ampliando las posibilidades de que se presenten cambios en los procesos y detalles

(ejemplo el amarre y tipo de conexión o el tejido de la hoja de palma), al igual que cambios en las dimensiones y su forma. De allí surge la necesidad de realizar una documentación periódica que permita registrar los cambios y proponer recomendaciones en las prácticas de construcción indígena.

Si se pudiera controlar los materiales desde su obtención, tratamiento y empleo en la construcción y sus procesos, se podrían brindar aspectos beneficios para el resultado final de la maloca y su operación, se podría aumentar su durabilidad, su estética con el fin de beneficiar a las tribus indígenas y promover su cultura y el turismo.

Es importante proponer algunas acciones que beneficien no solo a las tribus indígenas en la construcción de su maloca y su importancia cultural, si no también fomentar un turismo que tenga como objetivo el conocimiento desde su esencia a la cultura de los indígenas haciendo vivir la experiencia de alojarse en una auténtica maloca y así reducir el impacto ambiental que pueda producir la construcción de complejos hoteleros destinados al turismo.

En esta investigación se pretenden presentar una descripción de la construcción y recomendaciones que contengan los procesos que se deben llevar a cabo en el tratamiento de la madera y algunos procedimientos que brinden una mayor durabilidad a la maloca con el fin de fomentar el turismo y mitigar los impactos ambientales que se puedan generar por esto. Para esto se realiza una recopilación de literatura existente que ayude a visibilizar los avances que han tenido otros autores para concluir algunos aspectos que aún no se han trabajado y las salidas de campo realizadas en la zona para recomendar los tratamientos de las maderas que incrementen la durabilidad de la maloca.

2. MÉTODO

Este estudio se basa en la comparación de distintos estudios preexistentes e intentando establecer nuevos resultados. Actualmente los procesos se facilitan debido a la gran cantidad de contenidos disponibles en la red, pero se convierte en parte fundamental la elección y la depuración de información, ya que no todos los contenidos disponibles relacionados con el tema que se quiere abordar son útiles para lo que se desea evaluar y no todo lo encontrado se debe tener en cuenta. Es por ello que toma vital importancia una revisión bibliográfica la cual se debe realizar en la etapa inicial de la investigación. Este es el punto de partida para desarrollar nuevas ideas e iniciar procesos de comparación [9]. En el presente estudio, se pretende presentar algunos conocimientos que ya se han descrito y documentado acerca de las viviendas tradicionales indígenas y su modo de construcción.

Inicialmente, con el fin de recolectar información y realizar una búsqueda e investigación de los productos literarios existentes relacionados con las viviendas tradicionales indígenas en el Amazonas y por medio de la selección de palabras claves se elaboró una búsqueda especializada, utilizando sitios de búsqueda como Google Scholar y programas como Public or perish. Posteriormente, se generó un listado de los artículos que se encontraron y podían tener relación con la temática tratada.

Las palabras clave elegidas para ejecutar la búsqueda, cobran vital importancia ya que de ellas depende la especificidad de los contenidos que se van a encontrar y que tan útiles pueden ser para la investigación. En esta parte de la investigación se seleccionaron las palabras claves de acuerdo con el objetivo de la investigación y teniendo el límite de resultados que se generan a partir de las mismas.

En este caso, se seleccionaron palabras como: maloca, viviendas indígenas, hoja de palma, construcción vernácula, entre otras. Luego de obtener y listar los artículos y piezas literarias relacionados con la temática de la maloca, se procedió a realizar una revisión de su contenido y generar un resumen de cada uno de estos, extrayendo las características y conclusiones principales. De acuerdo con el resumen del documento, se estudió si era útil o no para proceder a revisar el contenido completo del mismo.

Con el objetivo de evaluar la calidad de los artículos, se realizó una matriz de literatura, en la cual se extrajeron y consignaron aspectos fundamentales de cada artículo. Luego de revisar el contenido, temática y hallazgos de la literatura encontrada, se procedió a seleccionar la información para consignarla en la

matriz, el procedimiento para ello inicia con la citación del artículo en normas APA, esto se obtiene por medio del buscador Google Scholar o también se generan por elaboración propia.

En el siguiente campo se establece el marco teórico, el cual indica el tópico que pretende abarcar, también se establece la pregunta de investigación o su hipótesis, esta información se puede extraer realizando una revisión de la introducción y de los objetivos, con esta ya se puede vislumbrar de manera amplia la temática que se tratara más adelante. Otra característica que lista la matriz, son las características de grupo, aquí se establece a que grupo, población o muestra está dirigida y ejecutada la investigación, este aspecto también es de vital importancia porque allí se puede identificar si se trata de estudios realizado a grupos y tribus indígenas los cuales, son el objetivo de este estudio.

El procedimiento se refiere a el modo de ejecución de la ponencia y como fue desarrollado, con qué argumentos fue evaluado y de qué manera o con que metodología. Se establece si el estudio es de índole experimental o correlacional, lo que indica si los resultados del análisis y su composición consisten en metodologías que conllevan a la realización de experimentos o análisis de datos y busca generar un resultado basado en observaciones generadas en el mismo estudio o, por otra parte, consiste en procedimientos correlacionales que buscan investigar y comparar teóricamente y otra manera estudiar literatura ya existente y estudios ya realizados. Por último, se consigna en el cuadro los hallazgos obtenidos por cada uno de los estudios.

Para verificar la calidad y utilidad de estos artículos, se tuvo en cuenta que estuvieran relacionados con el tema constructivo, ya que existe bastante literatura que aborda y se enfoca en mayor medida a los temas culturales representativos de este tipo de viviendas ancestrales de manera descriptiva de las tribus indígenas y no ahondan en la construcción ni en los materiales.

Los contenidos literarios encontrados y estudiados hasta aquí, se pueden destacar en varios grupos, por ejemplo, los que tratan la temática de las metodologías de construcción de la maloca, en estos se pudieron encontrar procedimientos para la edificación de estas viviendas, son artículos explicativos que cuentan con información desde como cimentar la maloca hasta su proceso de techado y claramente los tipos de materiales que se utilizan para llevar a cabo todo el proceso.

Por otra parte, se pueden destacar las investigaciones que se centran en estudiar los materiales y sus características entre las cuales se encuentran su durabilidad y su disponibilidad. La hoja de palma es tema perteneciente a gran parte de la literatura encontrada, debido a su alto empleo por parte de las tribus indígenas, es por esto que este tema también cobra alta importancia en el análisis bibliográfico. Adicional a la revisión de literatura se utiliza la información de campo recopilada de la interacción directa con la comunidad de Puerto Nariño, Amazonas, en el marco de un proyecto de investigación.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 La Maloca y sus materiales

En la Amazonía colombiana, lugar donde habitan en su mayoría tribus indígenas quienes ancestral y tradicionalmente han construido sus propias viviendas, se ubica la maloca en sitios hechos con una variedad de usos, no solo con el objetivo de refugio y descanso, sino también de encuentro para rituales, celebraciones, ceremonias y todos los acontecimientos importantes de la tribu. La maloca son parte fundamental de un grupo indígena en la Amazonía, es por ello su forma de construcción se trasmite a través de las generaciones, estas viviendas conservan su cultura y, les ayudan a ofrecer y honrar a sus deidades.

Maloca y chamán intervienen la interacción con la naturaleza y es uno de los principios ecológico-cultural que rige las relaciones con el medio ambiente en las comunidades indígenas. En este sentido cumple tres funciones fundamentales en la comunidad indígena [5]:

"... La maloca es considerada de cierta manera como la unidad de consumo, allí llegan los productos del bosque, la cacería, la pesca y los productos cultivados para ser procesados, repartidos y consumidos por todos sus ocupantes y visitantes..."

"... actúa como unidad ritual, una maloca invita a otra para la realización de los bailes y de igual manera actúa como unidad de intercambio para la realización de mingas, trabajos colectivos..."

"...se centraliza el control del uso de los recursos, cuya magnitud es siempre conocida por los capitanes o jefes de maloca, encargados de la organización de los trabajos, y por los chamanes que regulan las relaciones simbólicas con los dueños espirituales..."

Ahora bien, desde el período de extracción del caucho, al cacique de la maloca se le dio la denominación de capitán, sus tareas estaban centradas en *"... el manejo de la vida ritual comunitaria del clan en el que basa su autoridad y derecho al mando. El capitán conoce historias, puede ejecutar rituales como derecho heredado de su padre o madre y protege a su gente contra brujerías, enfermedades o calamidades públicas ..."* [6].

Estas construcciones vernáculas llamada maloca (Figura 2) simbolizan la construcción tradicional de las tribus indígenas, fueron construidas sin asesoría ingenieril ni de arquitectura, son viviendas espontaneas que su metodología de construcción y materiales se transmite a través de las diferentes generaciones de una tribu, hechas desde grupos indígenas muy antiguos por medio de hojas de palma y troncos [1]. La maloca es en resumen, el eje indispensable de toda tribu indígena, es el hogar antiguo y familiar en el que se desempeñan todas las actividades culturales, es un lugar sagrado en el cual interactúan sus creencias, la tierra y los mismos miembros del grupo que allí habitan [4].



Figura 2. Ejemplo de Maloca Indígena del Amazonas

En el proceso constructivo de la maloca, las tribus emplean diferentes tipos de materiales los cuales son obtenidos directamente las zonas en donde habitan. Entre los materiales principales se pueden encontrar la hoja de palma, utilizada para conformar los techos, madera o troncos de palma y otras especies para construir las cimentaciones, bejucos para enlazar entre otros. Este tipo de construcciones se basa o se cimienta en rollizos de madera las cuales son empotradas en el suelo con el fin de que brinden resistencia y sostengan la maloca, también la madera es utilizada en lo pilotes, las vigas, viguetas y muros. Las lianas o bejucos son los materiales utilizados para enlazar las piezas de madera y demás componentes de la maloca. Estos materiales también son conseguidos dentro del hábitat que ocupan los indígenas.

3.1.1 La hoja de palma

Con respecto a la hoja de palma, existen algunos estudios que han revisado la forma de cómo se emplea este material para la construcción de las viviendas indígenas, abarcan temáticas como la adquisición, los tratamientos, las especies, la durabilidad y algunos tratamientos a las cuales pueden ser sometidas para su empleo en el techado de la maloca [10-13].

Las palmas son parte fundamental del ecosistema de bosque en la Amazonía, debido a su gran presencia y la masiva utilidad que le dan las tribus indígenas en construcción de la maloca, alimentación, medicina, fabricación de herramientas para caza, trastes instrumentos, en su vestimenta, entre otros [7]. Aunque la hoja es el elemento más utilizado en el proceso de techado de sus viviendas, cabe destacar que las otras partes de estas especies también son explotadas, como son sus semillas y tronco que, se convierten en factores explotables debido a la imposibilidad de obtener frutos de troncos tan altos [14].

Es importante proponer distintos estudios que abarquen la utilización sostenible de la hoja de palma ya que no existe regulación alguna y por medio de metodologías, tratamientos y procesamientos propuestos se puede aportar en el cuidado del ecosistema amazonio y a un uso sostenible de los recursos utilizados por los indígenas en la construcción de su maloca, y utensilios.

Las especies de hoja de palma utilizadas para techar las viviendas deben garantizar protección del interior de la maloca, brindándole impermeabilidad, aislándole de la intemperie y protegiéndola de gradientes del clima. Muchas veces las tribus emplean algunos tipos de hoja de palma que para sus creencias son las indicadas y las que se deben de utilizar también con metodologías de construcción que no son las adecuadas para garantizar dichas condiciones.

Si tuvieran unas recomendaciones y propuestas desde lo técnico, podrían mejorar las características de sus viviendas y su entorno, protegiéndolo de sobre explotación y mejorando la calidad de vida dentro de sus viviendas. En las visitas y diálogos con la comunidad se logró establecer que una de las especies más utilizadas para el techado de las viviendas tradicionales es la palma Caraná como ha sido reportado en [15].

Para la construcción de techos con hoja de palma (Figura 3), no solo se utilizan las hojas, también son necesarios troncos pequeños y delgados provenientes de diferentes tipos de palma como la de chontaduro [4, 16-17]. Las hojas se van amarrando al listón de madera, para que después se puedan empezar a tejer o entrelazar entre hojas con los otros listones y sus hojas amarradas entre sí.

Estas secciones deben tener bastantes hojas con el fin de que cuando se entrelace con las otras no haya espacios ni vacíos que permitan la entrada de agua. Varios listones entrelazados configuran un paño, este se va ubicando de manera ascendente y teniendo en cuenta un traslapeo entre paños, estos van enlazados por medio de bejucos a la estructura previamente implementada que le dará soporte a la cubierta.



Figura 3. Ejemplo de uso de hoja de palma en construcción indígena en el Amazonas

3.2. La construcción de la maloca

La construcción de la maloca es un proceso ancestral que llevan a cabo las tribus indígenas encabezado por su chaman, utilizando materiales obtenidos en su mismo entorno y realizando procesos constructivos sostenibles los cuales debido a su vida útil ayudan a la reducción de sobre explotación de recursos. Dentro de la cosmovisión indígena se percibe la construcción de la maloca como una técnica sustentable, es un pensamiento y comportamiento en general de las tribus indígenas ya que la relación entre estas y la naturaleza siempre es llevada con respeto por los recursos naturales y utilizando solo lo necesario, regulando la actuación del ser humano en el bosque y lo que consume para poder vivir en él [5].

Es importante un ritual que practican los indígenas previamente al inicio de la construcción de la maloca, en donde los abuelos de la tribu solicitan una especie de permiso a la naturaleza para utilizar sus recursos en el proceso de construcción y también, solicitando el espacio donde se establecerá la vivienda [4].

El proceso de construcción consiste en varios pasos organizados en los que coinciden algunos de los estudios existentes. La construcción inicia con el replanteo de la maloca, localizando en el suelo el contorno y donde se ubicarán las vigas u horcones y los pilotes, se utilizan especies como brea caspi o huacapú. Luego se realiza la excavación que se debe hacer directamente en el suelo y donde se empotraran las bases o rollizos de soporte y, se instalan las vigas realizando amarres por medio de lianas en buen estado.

Después se inicia el proceso de techado por medio de las hojas de palma y así ir entrelazando y amarrando estas hasta conformar el techo de la vivienda en su totalidad [1]. La Figura 4 permite visualizar estos elementos en una Maloca terminada.



Figura 4. Maloca Construida

3.3. Detalles en la colocación de la hoja de palma

Los techos en hoja de palma deben contar con 2 elementos básicos y uno opcional como lo son la estructura, hecha de troncos de madera que en muchos casos también provienen de la palma, la cual soportará todas las cargas que le infringirá la cubierta, esta estructura deberá soportar tanto el peso de los materiales como los movimientos producidos por el viento, el peso de la lluvia y otros aspectos climáticos.

La cubierta es el componente que está conformado por la hoja de palma y la cual se debe instalar de manera que garantice la mayor impermeabilidad, esto depende de que tan entrelazadas están las hojas entre sí, la cantidad de hojas empleadas y la manera de cómo se disponen sobre la estructura, es recomendable realizar este proceso de abajo hacia arriba con el fin de que el orden de los paños de hoja de palma entrelazada se traslape de forma correcta y no permitan el paso del agua.

En esta parte también es importante verificar la pendiente que brinda la estructura y con la que quedara la cubierta, para que el agua tenga caída y salida por gravedad. Por último, se pueden encontrar en algunos casos elementos especiales como claraboyas que se construyen con el fin de brindar iluminación al interior de la maloca [3].

3.4. Especies identificadas en las comunidades de Puerto Nariño

Durante el recorrido con la comunidad de Puerto Nariño con algunos miembros del municipio, se reconstruyó la siguiente información sobre algunas especies nativas (Figura 5) empleadas por las comunidades indígenas que hacen parte de la comunidad en la construcción de sus viviendas.



Figura 5. Tipo de árboles o Palmas identificados en el recorrido alrededor de la comunidad de Puerto Nariño

- Árbol cabeza de mico (*Licania platypus*): su nombre proviene de la forma de su fruto (Figura 5a). Se emplea en las casas construidas dentro de la selva (donde no hay disponibilidad de otras especies) y no es muy recomendable debido al ataque de la polilla.

- **Árbol pichirina (*Vismia gracilis*):** Se utiliza para las barandas de la maloca, es decir para el cerramiento perimetral o elementos auxiliares para sostener la cubierta (correas, cortavientos, o tensores). También es una planta que se usa con fines medicinales (Figura 5b).
- **Árbol Chicle Huayo (*Lacmellea lactenses*):** Se caracteriza por tener espinas en su tronco (Figura 5c). Se emplea para extraer secciones rectangulares de mediano tamaño llamados comúnmente listones.
- **Palma de asai (*Euterpe oleracea*):** Su tronco se utiliza para generar horcones de base (postes para elevar la estructura por encima del nivel suelo natural) y también, generar tablones de piso a partir de la apertura de su corteza debido a la alta durabilidad natural que tiene esta palma (Figura 5d).
- **Palma Yarina (*Phytelephas macrocarpa*):** Es una palma de baja altura, cuya hoja se utiliza como forraje para la estructura de techo (proceso de techado) en la mayoría de las malocas de la zona debido a que es una especie abundante. En algunos casos se usa para el cerramiento exterior también (esta se puede ver en la Figura 8f de la Maloca).
- **Palma de Pona barrigona (*Riartea deltoidea*):** Es una planta cuyo tallo se usas principalmente para extraer horcones que sirven como parales y correas (Figura 8e).
- **Árbol de remocaspi (*Aspidosperma*) y árbol renaco (*Moraceae; Ficus trigona*):** De estos se toma la corteza para formar elementos de sostenimiento o cerramiento (Figura 6a).
- **Árbol de acapó (*Acacia polyphylla*) o charapilla (*Fabaceae; Dipteryx odorata*)** se utiliza para levantar las viviendas palenqueras en zonas húmedas y por los cambios de nivel del río Amazonas y sus afluentes debido a su alta durabilidad (Figura 6c y Figura 7).

Por otra parte, los amarres se realizan con bejucos provenientes de diferentes plantas disponibles de la zona. Previo al uso de la madera, esta normalmente se almacena a cierta altura del nivel del suelo para su secado y fácil acceso durante la construcción (Figura 6d).



Figura 6. Otros elementos constructivos identificados en el recorrido de la comunidad de Puerto Nariño



Figura 7. Maloca deshabitada tipo palenquera

En cuanto a los tiempos de construcción, la maloca que se muestra en la Figura 8 tomo aproximadamente 1 mes. Básicamente las labores se dividen en mingas sucesivas para las tareas: 1) extracción de las maderas, 2) armado del esqueleto de la maloca, 3) extracción de hoja de palma, y 4) instalación de hoja de palma en la cubierta.



Figura 8. Maloca lista para rituales

3.5 Afectaciones y ataques típicos en los materiales maderables de la Maloca

En esta sección se presentan las diferentes afectaciones que pueden llegar a sufrir las maderas y el origen de su daño, los factores que producen su deterioro se presentan a continuación [18]:

- *Factor Biótico:* Se refiere a procesos originados por organismos que se alimentan de la madera, de este tipo existe gran variedad y de manera general se pueden analizar el conjunto de seres xilófagos como son los insectos, organismos marinos y hongos.

Dentro de los insectos se pueden distinguir aquellos que viven inicialmente como larvas, los cuales luego de ser depositados en forma de huevecillos dentro de la madera, eclosionan dando lugar a larvas que se alimentan de la madera durante todo su ciclo larvario. Luego realizan recorridos para llegar a la superficie de la madera y así poder realizar su metamorfosis y continuar su ciclo de vida. Este proceso le produce a la madera unos caminos por donde se mueven estas especies, generándole así, cavidades vacías que repercuten en la estabilidad, durabilidad y resistencia.

Los insectos con eusocialidad son aquellos que forman una organización para vivir en sociedad como por ejemplo las hormigas o termitas. Estos tipos de insecto establecen un nido por medio de su reina o miembros sexuales que dan vida a los demás y con la ayuda de diferentes roles que tienen dentro de su colonia, por ejemplo, los constructores instauran un nido que en algunos casos puede ubicarse debajo de la tierra, pero en otros pueden estar localizados dentro de cuerpos de madera que se encuentra generalmente en estado seco.

Otros organismos que generan gran afectación en la madera son los hongos, estos son parásitos que se alimentan de madera y generan cambios de color y de textura en la superficie de la madera y, puede ser de gran afectación debido a que, en muchos casos, estos se encuentran al mismo tiempo con los insectos xilófagos. Estos organismos requieren de humedad para poder desarrollarse, es decir que si la madera no tiene humedad este tipo de patología no es posible que lo ataque.

Los hongos se pueden clasificar en dos tipos: los de pudrición y los mohos, estos últimos no son de gran importancia para el estudio porque no generan afectación a las propiedades estructurales de la madera ya que solo se desarrollan en la corteza exterior. Por otra parte, los de pudrición llegan a generar bastante afectación debido a que se alimentan como tal de la madera, produciendo un daño total a esta, pérdida de las propiedades mecánicas y la resistencia, es decir, la madera se va pudriendo hasta el punto de su destrucción.

Cuando la madera se encuentra en contacto con el agua marina, es expuesta a ataques por parte de moluscos los cuales, atacan y generan afectaciones en la parte interna de la madera mientras que los crustáceos lo realizan en la parte superficial. Las embarcaciones de madera son las más afectadas por este tipo de ataque y existen especies de moluscos que se alimentan y se alojan dentro de la madera durante toda su vida como por ejemplo el teredo. Los daños causados por los crustáceos xilófagos son mayores, ya que tienen la capacidad de trasladarse al interior de la madera generando caminos vacíos que con el choque del agua se hacen más grandes y pierde el recubrimiento.

- *Abiótico.* Estos se refieren a los aspectos provenientes naturalmente del clima como son la exposición a los rayos del sol y a la lluvia, afectan directamente la superficie de la madera. El daño más representativo por esta patología es debido a que la superficie obtiene humedad y rápidamente la pierde por efectos de los rayos del sol provocando que la capa externa sufra ciclos de expansión y posterior pérdida de volumen. El porcentaje de humedad que llega a contener la madera influye directamente en las tensiones que puede llegar a sufrir por el proceso de cambio volumen. Además, Los rayos solares no solo afectan directamente a la corteza de la madera sino también, hace que cambie de color.
- *Químicos.* La madera es uno de los materiales que mejor enfrenta los ataques químicos, estos se pueden traducir únicamente en cambios de color, pero ante los jabones, algunos elementos alcalinos y los ácidos si se presentan algunas afectaciones. Por ejemplo, cuando entra en contacto con un ácido fuerte, esto les produce a algunas maderas rígidas un proceso de hidrólisis dando paso a una apariencia como la de la pudrición.

Muchas clases de madera son ácidas en su composición, pero existen algunas como el roble que despiden ácido cuando se encuentran desecándose y esto, aunque para la madera no es malo si puede afectar de manera grave a los metales con los cuales entre en contacto, los puede oxidar y dañar drásticamente. Por su parte los agentes alcalinos producen un pequeño deterioro y pérdida de capacidad, pero para el empleo de madera en construcción no es grave ni afecta de manera considerable. La humedad en la madera o el cambio de estado entre húmedo y seco genera pequeñas cantidades de ácido.

Debido a la composición molecular de la madera, es un material combustible, aunque no es tan fácil que se quemara la madera compacta, se necesita cierta temperatura para que esta se incendie y debido a sus características se va quemando por capas lo que permite que la estructura interna sea protegida por algunos momentos por una capa de corteza carbonizada que también presenta condiciones de aislador térmico. Además, depende también de la forma de su estructura interna la capacidad de combustión, si es más densa se demora más en quemarse y otro factor importante en el retraso de los procesos de quema es la humedad de la madera ya que esta tiene que secarse antes de que empiece a arder.

3.6 Recomendaciones para la construcción durable

En esta sección se propone los elementos que se podrían incorporar y que no se encontraron como práctica común en las salidas de campo o visitas técnicas realizadas en el proyecto de investigación en la comunidad de Puerto Nariño y otras comunidades aledañas en el departamento del Amazonas.

De acuerdo con el fenómeno documentado por [19], la construcción con materiales biológicos ha perdido credibilidad alrededor del mundo en donde, se prefieren materiales robustos y procesados como el concreto, esto debido a algunos factores con los que cuentan materiales naturales como la madera, por ejemplo, procesos en los cuales algunos desarrollos de organismos patógenos, los cuales pueden llegar a dañar, reducir las propiedades mecánicas y hasta fallar los materiales. Se ha desestimulado el uso de la madera en la construcción siendo uno de los materiales más usados en la antigüedad y que ofrece muchos beneficios como la estética que otros no proveen.

Debido a la creciente necesidad de construcción de infraestructura, se opta por emplear materiales procesados los cuales conllevan procesos extensos, utilización de grandes cantidades de energía y afectaciones al medio ambiente para su producción. Sin embargo, también es claro que la madera es un

recurso que el hombre puede llegar a renovar por medio de planes serios y establecidos, al contrario de otros minerales, la producción de madera puede ser controlada, su producción no es costosa y posee buenas propiedades mecánicas [19]. Además, por medio de planes de reforestación como los que practican algunos países desarrollados, el empleo de este recurso no se amenaza de manera peligrosa al medio ambiente y se estimula, por tanto, el uso responsable de la madera en procesos de construcción sostenible.

Si se emplean procesos actuales de conservación como, por ejemplo, sustancias que eviten las afectaciones y ataques típicos de la madera, es posible aumentar la durabilidad de esta y contribuir con una construcción sostenible de viviendas indígenas en la Amazonía colombiana. A partir de la identificación de los principales materiales de construcción de las viviendas, una discusión de las causantes de los deterioros de la mismas y teniendo en cuenta el acceso/disponibilidad de materiales en la zona, se identificaron algunos procedimientos que pueden brindar una mayor durabilidad a las maderas. Dependiendo la patología que ataca la madera, se establece un tipo o procedimiento a seguir para la protección y sanado de la misma. Por ejemplo, la aplicación de químicos para la neutralización de organismos y teniendo en cuenta las condiciones a las que puede estar expuesta la madera utilizada en la construcción de la maloca es importante proponer algunos procedimientos para evitar y mantener la madera en buen estado [18]:

- Para el tratamiento en contra de los hongos que atacan la madera generando putrefacción de la misma debido a la alta humedad de la madera, basta con eliminar el contenido de agua para evitar este problema, así que se hace necesario un mantenimiento periódico de los cuerpos de madera que garanticen que la humedad no aumente y que los hongos no se reproduzcan. La eliminación y la prevención de la humedad es un proceso curativo, pero se puede emplear antes para evitar que suceda por medio de procesos de secado de la madera.

También, se suelen utilizar algunos productos que, al inyectarlos dentro de la madera, ayudan a eliminar la humedad interna, se pueden aplicar químico o fungicidas con procedimientos con presión, sin presión e implantando la sustancia, este último es más utilizado cuando la madera se encuentra en una exposición continua con la humedad, ya que estos implantes estarán suministrando el químico durante más tiempo y así previene de mejor manera la humedad y los hongos.

Para realizar este tipo de procesos es necesario retirar la corteza o partes de la madera que se encuentra afectada para que el producto tenga contacto con la parte que aún está en buen estado y cuando se realicen implantes de madera para compensar la pérdida de la sección transversal del elemento estos deben ir a los 2/3 del ancho total de la pieza de madera. Es importante tener en cuenta que para el uso de los fungicidas se debe capacitar a la población indígena para ello, ya que algunas de estas sustancias pueden ser tóxicas.

- Los procesos para eliminar los insectos larvarios que se incrustan en la madera son similares a los llevados a cabo para eliminar hongos. También, en estos se debe delimitar y limar las áreas dañadas dependiendo si es en la parte de la corteza o hacia el interior, cuando ya ha sido afectada se debe aplicar una metodología que la sane. En este caso se deben emplear taladros que penetren la madera y así poder introducir el producto curativo. El número de orificios dependerá del tamaño del cuerpo de madera al que se le aplica el tratamiento, se recomienda que sean 3 por 1 metro lineal y su fondo de 2/3 del espesor total.

Sobre la superficie se debe aplicar por medio del uso de pinceles o brochas más producto para evitar la entrada de insectos. También, es posible utilizar productos aplicables con humo, estos se emplean cuando el acceso a las zonas o espacios donde se encuentran los cuerpos de madera son estrechos o son de difícil y a veces imposible acceso, estos se aplican por medio de dispositivos pirotécnicos que producen nube de gas las cuales atacan a los organismos que ya se encuentran en la superficie de la madera pero no llegan hasta su interior, es por ello que este tipo de metodologías se debe repetir periódicamente para eliminar los atacantes cuando ya salen de su estado de larva y están en el exterior.

Es importante destacar que los procedimientos anteriores se pueden aplicar antes de la construcción, con el fin de prevenir la entrada de los insectos, que se genere pudrición y otros daños derivados. Dichos

procesos se ejecutan únicamente en la corteza, con los mismos productos que se emplean en los procesos curativos y su cantidad recomendada por cada metro cuadrado se encuentra alrededor de 250 o 300 gramos de producto.

Ahora bien, es de extremada importancia tener en cuenta algunas recomendaciones que pueden afectar la salud y vida de la comunidad indígena. Se debe controlar la exposición del gas en contacto con la madera, cuando se emplea fumigación por medio de sustancias en estado gaseoso debido a la alta toxicidad que poseen estos productos. En este sentido, no solo es importante apropiarse de estas recomendaciones de construcción sino también los elementos y condiciones de seguridad que eviten lesiones en las personas que adelantan estos procesos.

4. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo se ha documentado la importancia que reviste la maloca para las comunidades indígenas de la Amazonía, la cual, es fundamental para la vida y se extiende más allá de un refugio o sitio de descanso para formar parte de las relaciones sociales, de poder, gobernanza y las prácticas espirituales/medicinales propias de su cultura. Bajo esta significancia, se fundamenta la necesidad de proponer y propiciar prácticas de construcción indígena durable en esta región.

Se identificaron los documentos existentes que relatan los procesos constructivos y culturas de este tipo de edificaciones ancestrales, en particular los que obedecen a los criterios establecidos en la metodología de este estudio. Al realizar una revisión de los materiales empleados en la construcción de la maloca de las tribus indígenas de la Amazonía colombiana, se observó que la madera y la hoja de palma son los materiales predominantes en este tipo de construcción. Debido a las características de la Amazonía colombiana, las condiciones de clima, temperatura y humedad se propicia la generación de patologías que comprometen la durabilidad de la madera. En este sentido, los organismos como los hongos e insectos abundan debido a dichas condiciones y es importante el tratamiento de la madera para protegerla y hacerla más duradera.

A partir de las técnicas existentes para el tratamiento de maderas se proponen algunas recomendaciones para ser incorporadas en la construcción indígena durable que se encuentran enfocadas básicamente en la eliminación de la humedad como proceso curativo para el tratamiento en contra de los hongos y la aplicación de químicos o fungicidas para la neutralización de organismos. Para este último, se debe capacitar a la comunidad para el manejo seguro de estas sustancias, al igual que algunos equipos como son los taladros.

Se espera que las recomendaciones propuestas sean socializadas para generar apropiación en la comunidad y en miras a su implementación monitoreada en los próximos años que permita a su vez determinar el impacto en la durabilidad de las malocas.

Agradecimientos

Producto derivado del proyecto INV-DIS-3164 financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada - Vigencia 2020. Las imágenes y experiencia que se documenta en este escrito fueron posibles gracias a las salidas de campo del proyecto *Evaluación de los impactos socio culturales y ambientales de la estrategia de turismo sostenible planteada por la comunidad del Resguardo TICOYA desde la gobernanza ambiental, para dar cumplimiento a lo suscrito en la Convención Ramsar, a partir de la formación colaborativa y la formalización desarrollada en el año 2019, en el municipio Puerto Nariño - Departamento del Amazonas*. Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada por el apoyo recibido.

REFERENCIAS

- [1] North R. (2012). La Maloca: Arquitectura vernacular amazónica sustentable. *Consensus* 17(1), 129-142.
- [2] Padilla E. et al. (2014). Sistema estructural sostenible medioambientalmente de Maloka hecha con madera, bahareque y boñiga de vaca en el municipio de Tuchín, Departamento de Córdoba, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA* 261-282.

- [3] Álvarez A. et al. (2018). Análisis de las cubiertas en palma para tecnificar procesos constructivos en construcciones tradicionales. Trabajo de Grado. Universidad la Gran Colombia.
- [4] Díaz L. et al. (2019). Maloca de la etnia Muina Murui, la construcción vernácula de los indígenas Uitoto. Trabajo de Grado. Universidad la Gran Colombia.
- [5] Rodríguez C. (2008). La Nueva Maloca para el Desarrollo Sostenible en la Amazonia. *Revista Colombia Amazónica* 1, 101-111.
- [6] Castro D. (2016). La Visión de un Maloquero: Entre la Tradición y el Cambio. *Revista Colombia Amazónica* 9, 57-74.
- [7] Jaimes M. et al. (2018). Palmas útiles en tres comunidades indígenas de La Pedrera, Amazonia colombiana. *Caldasia* 40(1), 112-128.
- [8] Reyes V. et al. (2013). Evidence of traditional knowledge loss among a contemporary indigenous society. *Evol. Hum. Behav.* 34(4), 249-257.
- [9] Guirao S. (2015). Utilidad y tipos de revisión de literatura. *Revista de enfermería* 9(2), 1-13.
- [10] Mesa L. y Galeano G. (2013). Usos de las palmas en la Amazonia Colombiana. *Caldasia* 35(2), 351-369.
- [11] Monroy C. (2011). Impacto del uso sobre la estructura poblacional de dos especies de palmas. Alternativas participativas de manejo en la comunidad Ticuna de San Martín de Amacayacu. Trabajo de Grado. Universidad de los Andes.
- [12] Navarro J. (2015). Dinámica poblacional de tres palmas utilizadas en construcción (*Lepidocaryum tenue*, *Socratea exorrhiza* e *Iriarteia deltoidea*): Alternativas para su manejo sostenible en la Amazonia colombiana. Disertación Doctoral. Universidad Nacional de Colombia.
- [13] Salas J. (2016). Dinámicas de uso y manejo del recurso palma caraná (*Lepidocaryum tenue*) en la comunidad de Zaragoza, Leticia, Amazonas. Trabajo de Grado. Pontificia Universidad Javeriana.
- [14] Manzi M. y Coomes O. (2009). Managing Amazonian palms for community use: a case of aguaje palm (*Mauritia flexuosa*) in Peru. *Forest Ecology and Management* 257(2), 510-517.
- [15] Trujillo A. (2016). El tejido de la palma caraná como referente de sustentabilidad. *Visión electrónica* 10(1), 125-136.
- [16] Sinchi. (2009). Guía práctica para el manejo sostenible de tres especies de palmas Alto y Bajo Cardozo Corregimiento de Tarapacá – Amazonas. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi.
- [17] Navarro J. et al. (2013). Cartilla para el manejo de las palmas usadas para techar: Caraná (*Lepidocaryum tenue*) y zancona (*Socratea exorrhiza*). Universidad Nacional de Colombia.
- [18] Arriaga F. et al. (2002). Intervención en estructuras de madera. Aitim.
- [19] Fournier R. (2008). Construcción sostenible y madera: Realidades, mitos y oportunidades. *Tecnología en Marcha* 21(4), 92-101.

Estimación numérica de los parámetros de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica a baja temperatura

Jesús Manuel German-Carcaño¹
Beatriz Romero-Ángeles²
Jacobó Martínez-Reyes³
Daniel Maya-Anaya⁴
Arturo Sánchez-Cervantes⁵
Guillermo Urriolagoitia-Sosa⁶
Instituto Politécnico Nacional
México

En este trabajo se presenta una evaluación en dos dimensiones de los parámetros de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica MFLE, que se producen en una placa agrietada en el centro sometida a un esfuerzo de tensión uniaxial uniforme (Modo I) y baja temperatura. Para obtener los valores a temperatura ambiente del Factor de Intensidad de Esfuerzos K_I y la Tasa de liberación de energía G se utiliza el programa ANSYS® y se realizan las distintas simulaciones. Posteriormente, para la estimación de G ajustados a una temperatura de -100°C , se realizaron los cambios precisos y se procedió a efectuar las nuevas simulaciones, seguido del cálculo de los valores de K_I para una temperatura de -100°C a partir de la ecuación de Irwin la cual relaciona G y K , explorando en todos los casos, las teorías de elasticidad de la Deformación unitaria plana DP y el Esfuerzo Plano EP. Se calcula el porcentaje de variación en los resultados de K_I y G para los estados de DP y EP a temperatura ambiente y a -100°C . Luego se exhibe una comparación del comportamiento de G y K_I a temperatura ambiente frente a una temperatura de -100°C , explorando las dos teorías de elasticidad mencionadas. Con los resultados se evidencia que existe una variación de los valores de K debido a la disminución de la temperatura, con el apoyo del criterio de crecimiento global de las grietas en términos de G , esto a pesar de que el criterio de crecimiento de esfuerzos local representado por K depende únicamente de la geometría del cuerpo, el tamaño de la grieta, la carga y las condiciones de frontera.

¹ Magíster en Ingeniería Mecánica.

Contacto: german_17jun@hotmail.com

² Doctora en Ingeniería Mecánica.

Contacto: romerobeatriz97@hotmail.com

³ Doctor en Física de los Materiales.

Contacto: jacobomartinezreyes@gmail.com

⁴ Magíster en Ingeniería Mecánica.

Contacto: danmaa02@gmail.com

⁵ Magíster en Matemáticas.

Contacto: arturc4@hotmail.com

⁶ Doctor en Ingeniería Mecánica.

Contacto: guiurri@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El surgimiento de grietas o fracturas en los materiales ha sido durante largo tiempo un problema importante para la humanidad. En recientes años ha retomado gran relevancia, a causa del avance tecnológico y computacional. Asimismo, el surgimiento de fisuras es bastante común en la industria, dicho escenario provoca pérdidas monetarias e inclusive decesos de vidas humanas. De ahí emerge la importancia de caracterizar el comportamiento en la propagación de las grietas, dado que la interacción de estas aumenta su crecimiento, lo que resulta en un considerable decrecimiento de la resistencia del material y en ocasiones a la falla catastrófica.

En el siglo pasado, se estudió de forma analítica la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica MFLE, pero resultaba difícil su análisis a causa de la complejidad de cálculos que se requerían. Con la llegada de los métodos numéricos se estableció una gran herramienta para su estudio.

Sin embargo, de igual manera representaba un problema grande y complejo su solución. Lo anterior, se debe a la enorme cantidad de cálculos que se requieren. En la actualidad con los adelantos computacionales principalmente en el Método de Elementos Finitos MEF, el cual es un instrumento poderoso y más utilizados para estudiar las grietas, los problemas referentes a esta área se facilitan y se agiliza el proceso [1].

El MEF reduce el problema a un número de incógnitas al dividir el dominio en elementos y al expresar a la variable de campo desconocida en términos de las funciones aproximadas asumidas dentro de cada elemento. Estas funciones se precisan en los valores de las variables de campo en puntos específicos, denominados nodos.

Los nodos generalmente se ubican a lo largo de los límites de los elementos y conectan elementos adyacentes [2]. Independientemente del campo de aplicación, el proceso involucrado en el análisis del MEF son los mismos y a continuación se muestra brevemente el flujo de trabajo principal de dicho proceso [3]:

- *Pre-proceso.* En esta es destinada para establecer el tipo de análisis, el o los tipos de elementos y las propiedades mecánicas del material. Adicionalmente, se genera la geometría del modelo y se procede con el discretizado de dicho modelo. Posteriormente, se aplican los agentes externos y restricciones necesarias.
- *Solución.* En esta etapa se puede definir o modificar la aplicación de los agentes externos y restricciones. Además de precisar las opciones de solución y resuelve el problema.
- *Post-proceso.* En esta última fase los resultados se grafican, se ven y se exportan en uno de los post-procesadores.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Modos de fractura

Una grieta en un sólido consiste en caras superiores e inferiores separadas en la misma superficie antes de la deformación. Cuando el cuerpo agrietado se somete a cargas externas, las dos caras de la grieta se mueven una con respecto a otra, definiendo tres modos de fractura denominados Modo I, Modo II y Modo III, de manera que cualquier elemento agrietado puede describirse mediante uno de los tres modos básicos o sus combinaciones [4]:

1. Modo I (*Modo de apertura*): La grieta se abre perpendicularmente al plano de la grieta. Esto causado por la carga de tensión.
2. Modo II (*Modo deslizante*): Las caras de la grieta se desplazan en su plano, normales al frente de la grieta, lo que se correlaciona con una carga cortante transversal.
3. Modo III (*Modo de rasgado*): Las caras de la grieta se desplazan en su plano, paralelas al frente de la grieta, que está relacionada con la carga de corte longitudinal.

2.2 Mecánica de la Fractura Lineal Elástica MFLE

La MFLE es una rama de las ciencias de la ingeniería que estudia la falla de los sólidos a causa de la nucleación y posterior propagación de las grietas. Existen dos enfoques básicos para establecer los criterios de fractura o propagación de grietas: el enfoque del campo de esfuerzos en la punta de la grieta y el balance de energía.

Para el primer enfoque, la magnitud de los esfuerzos cercanos a la punta de la grieta está en términos generales caracterizado por el Factor de Intensidad de Esfuerzos FIE también conocido como K. La fuerza de este campo está completamente definida por K_I , K_{II} y K_{III} . El FIE se determina mediante la solución del valor límite específico definido por un cuerpo con grietas. Por lo que, los factores K dependen de la geometría del cuerpo, el tamaño y posición de la grieta, así como de la carga y las condiciones de frontera. Para determinarlos, generalmente es necesario encontrar primero la solución completa del problema del valor límite y luego analizar el campo de esfuerzos en la punta de la grieta [5].

Con respecto al segundo enfoque, la medida de la energía disponible para la propagación de un incremento de grieta está dado por la tasa de liberación de energía G. El incremento de longitud de la grieta a carga constante se refleja en un esfuerzo constante, el trabajo suministrado al sistema se convierte en un aumento de energía elástica y una energía consumida en la propagación [6].

Pese a que el criterio de crecimiento global de las grietas se expresó en términos de la tasa de liberación de energía G derivado de un balance energético y el criterio de crecimiento de esfuerzo local fue formulado en términos del FIE derivado de los esfuerzos en la punta de la grieta. Existe una relación entre G y K la cual se muestra en la ecuación (1).

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (1)$$

Donde: $E' = E$ para condiciones de Esfuerzo plano y $E' = E/(1-\nu^2)$ para condiciones de Deformación unitaria plana, siendo E el módulo de elasticidad y ν la relación de Poisson.

2.3 Condiciones del plano

Una condición importante del material para caracterizar el comportamiento mecánico de una muestra agrietada o sin fisuras, son los dos estados de carga principales de la elasticidad bidimensional. Los cuales se exhiben a continuación [7]:

- *Esfuerzo plano.* Esta es una condición de esfuerzos utilizada para cuerpos delgados, en el que el espesor de la muestra debe ser mucho menor al ancho. Por lo tanto, los esfuerzos a través del espesor son cero.
- *Deformación unitaria plana.* Esta condición particular es para cuerpos gruesos, que desarrollan un estado triaxial de esfuerzos local en la punta de la grieta. El esfuerzo de espesor total en coordenadas cartesianas es distinto a cero y la deformación unitaria a través del espesor es cero.

3. MÉTODO

En este trabajo se realizó un estudio numérico en 2D de los efectos en el FIE, que se producen en una placa agrietada en el centro sometida a un esfuerzo de tensión uniaxial uniforme (Modo I) y baja temperatura. El desarrollo de las simulaciones numéricas se emplea el paquete computacional ANSYS®, el cual utiliza el MEF como algoritmo de solución.

3.1 Dimensiones y condiciones de frontera

Con la finalidad de ahorrar recursos computacionales se simplifica el modelo utilizando las herramientas de simetría que es capaz de aplicar el programa ANSYS®, por tal razón únicamente se elabora una cuarta parte de la placa. Con dimensiones iguales a un ancho $b = 50$ mm, una altura $h = 100$ mm y un tamaño de

grieta inicial de $a = 1 \text{ mm}$ hasta $a = 20 \text{ mm}$ con incrementos de 1 mm . Asimismo, dicha placa está sometida a un esfuerzo uniaxial de tensión de $\sigma = 100 \text{ MPa}$, como se muestra en la Figura 1.

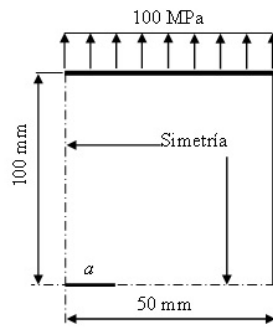


Figura 1. Dimensiones y condiciones de frontera del modelo numérico

El cálculo del K_I y G se realizan con la ayuda de los comandos KSCON y CINT respectivamente, explorando los dos estados de cargas principales de la elasticidad bidimensional; el estado de Esfuerzo plano y el estado de Deformación unitaria plana. Cabe mencionar que los comandos antes mencionados se rigen por las leyes de la MFLE. Por lo que, se asume que el material es homogéneo, lineal, isotrópico y continuo.

3.2 Propiedades del material

Se realizó una investigación en diferentes publicaciones nacionales e internacionales en las que consideran las consecuencias de las bajas temperaturas en los aceros. En dicha búsqueda se halló el trabajo de [8] en el que se realizaron estudios experimentales de las propiedades mecánicas en aceros de refuerzo, bajo temperaturas criogénicas. Para este trabajo se eligió por el caso más extremo obtenido, el cual se presenta en un acero HRB400, ya que presenta un cambio considerable en el módulo de elasticidad, elevando su magnitud de $E = 200 \text{ GPa}$ a temperatura ambiente hasta $E = 233 \text{ GPa}$ para una temperatura de $-100 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3 Obtención numérica de K_I a temperatura ambiente

El procedimiento de evaluación numérica de K_I aquí descrito se divide con respecto a los procesos involucrados en el análisis del MEF.

3.3.1 Generación del modelo (pre-proceso)

Como primer paso para la simulación se selecciona un análisis estructural, seguido del elemento sólido de 2D de alto orden del tipo PLANE 183, además de definir que se trabaja en un estado de Esfuerzo plano y que el análisis está dentro de la zona lineal elástica del material con módulo de elasticidad del acero tipo HRB400 de $E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$ y una relación de Poisson $\nu = 0,28$. A continuación, para el desarrollo del modelo se definen los puntos principales y líneas para construir el componente deseado. Es muy importante resaltar que se trabaja con una cuarta parte del componente original. Asimismo, se desarrollaron varias áreas para poder controlar el tamaño y forma de los elementos, como se muestra en la Figura 2.

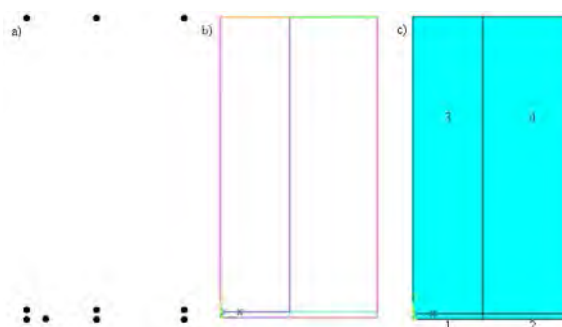


Figura 2. Desarrollo del modelo: a) Generación de los puntos principales, b) Generación de líneas, c) Generación de áreas

Se dividen las líneas de las áreas 2, 3 y 4 para obtener elementos de $1 \times 1 \text{ mm}^2$. En tanto que, en el área 1, las líneas se dividen de tal forma que tengan una longitud de 1 mm. Además, con ayuda del comando KSCON se asigna el tamaño del primer y segundo radio de los elementos con valor de 0.5 mm cada uno. Se divide en 12 elementos en la dirección circunferencial y se sesga $1/4$ de punto los nodos de la parte media de la primera fila de elementos, para realizar la discretización más fina.

Es muy importante mencionar que el comando KSCON genera automáticamente elementos singulares alrededor del punto clave especificado, lo que le permite controlar el radio de la primera y segunda fila de elementos, igualmente admite controlar el número de elementos en la dirección circunferencial. En la Figura 3 se ilustra el discretizado de las distintas áreas del modelo.

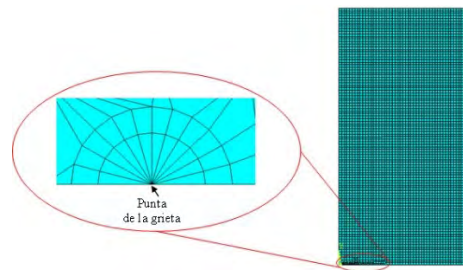


Figura 3. Discretizado del modelo

3.3.2 Solución del sistema (solución)

Una vez finalizado el modelo, la aplicación del agente externo y las condiciones de frontera, se manda a resolver el sistema.

3.3.3 Obtención de resultados (post-proceso)

Inicialmente, antes de solicitar los resultados, se genera el sistema coordenado local número 11, con el eje X paralelo y el eje Y. El cual debe ser perpendicular a la cara de la grieta. Además, con origen en la punta de la grieta. A continuación, se cambia del sistema de coordenadas general al sistema de coordenadas local 11. Después se define un camino a lo largo de la cara de la grieta, el cual se denomina *ruta*. El primer nodo en la ruta debe ser la punta de la grieta (1), el segundo es el nodo en el primer radio de la circunferencia (2) y el tercero es el nodo ubicado en el segundo radio de la circunferencia (3), todos ellos situados a lo largo de la cara de la grieta como se exhibe en la Figura 4.



Figura 4. Especificación de la *ruta* a lo largo de la cara de la grieta

Por último, con el comando KCALC se especifica que el modelo está regido por el estado de Esfuerzo plano, el programa realiza los cálculos necesarios y después arroja una pantalla como la que se muestra en la Figura 5 con el valor resultante de K_I .

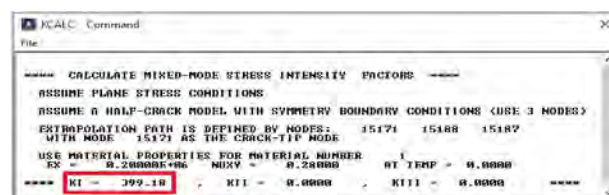


Figura 5. Resultado de K_I obtenido numéricamente para una longitud de grieta $a = 5 \text{ mm}$

3.4 Obtención numérica de G a temperatura ambiente

3.4.1 Generación del modelo (pre-proceso)

El primer paso para la simulación es igual al mostrado anteriormente, se selecciona un análisis estructural, seguido del elemento sólido de 2D de alto orden del tipo PLANE 183, además de definir que se trabaja en un estado de Esfuerzo plano y que el análisis está dentro de la zona lineal elástica del material con módulo de elasticidad del acero HRB400 de $E = 200\,000\text{ N/mm}^2$ y una relación de Poisson $\nu = 0,28$. A continuación, para el modelado de la geometría se definen los puntos principales y las líneas para trazar las áreas deseadas antes presentadas en la Figura 2.

Posteriormente, de igual forma se dividen las líneas de las áreas 2, 3 y 4 para obtener elementos de $1 \times 1\text{ mm}^2$, en el área 1 las líneas se dividen de tal forma que tengan una longitud de 1mm. Además, con ayuda del comando KSCON se fija el tamaño del primero y segundo radio de elementos con valor de 0,5 mm cada uno, se divide en 12 elementos en la dirección circunferencial y se sesga 1/4 de punto los nodos de la parte media de la primera fila de elementos, para hacer más fino el mallado como se mostró en la Figura 3. Y se introduce el agente externo en las líneas superiores en forma de una presión uniforme con un valor de 100 MPa, conjuntamente se aplican las condiciones de frontera en forma de simetría en las líneas laterales izquierdas y en la línea inferior como en el caso anterior.

3.4.2 Solución del sistema (solución)

Previo a resolver el problema (solución), se genera el sistema coordenado local número 11, con el eje X paralelo y el eje Y perpendicular a la cara de la fisura, además con origen en la punta de la grieta. A continuación, se cambia del sistema coordenado general al sistema local 11. Después se define un camino a lo largo de la cara de la grieta.

El primer nodo en la ruta debe ser la punta de la grieta, el segundo es el nodo en el primer radio de la circunferencia y el tercero es el nodo ubicado en el segundo radio de la circunferencia todos ellos situados a lo largo de la cara de la fisura como se expuso en la Figura 4. Posteriormente, se crea un componente con el nombre de CRACKTIP a partir de los 3 nodos asignados y se escriben las siguientes líneas de comandos:

```
CINT,NEW,1  
CINT,TYPE,VCCT  
CINT,CTNC,CRACKTIP  
CINT,SYMM,ON
```

Una vez finalizado el modelo, aplicación del agente externo, las condiciones de frontera y los pasos anteriores se manda a resolver el sistema.

3.4.3 Obtención de resultados (post-proceso)

Como paso final de la simulación, se escribe en la barra de comandos la siguiente línea:

```
*GET,G1,CINT,1,,CRACK,,1,,G1
```

El programa realiza los cálculos necesarios y después muestra una pantalla como la que se muestra en la Figura 6 con el valor resultante de G .



Figura 6. Resultado de G obtenido numéricamente para una longitud de grieta $a = 5\text{ mm}$

3.5 Obtención numérica de G a baja temperatura

Para la obtención de la tasa de liberación de energía G presente en una placa agrietada en el centro sometida a baja temperatura, se realiza el mismo procedimiento exhibido en el apartado anterior, con la diferencia de que en la sección del pre proceso se modifica el módulo de elasticidad, por el de $E = 233 \text{ GPa}$. para el acero HRB400 a una temperatura de $-100 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.6 Cálculo de K_I a baja temperatura a partir de G a $-100 \text{ }^\circ\text{C}$

Es posible calcular K_I si se despeja de la ecuación (1), como se muestra a continuación en la ecuación (2):

$$K_I = \sqrt{G * E'} \quad (2)$$

Donde $E' = E$ para condiciones de Esfuerzo plano y $E' = E/(1-\nu^2)$ para condiciones de Deformación unitaria plana, siendo E el módulo de elasticidad y ν la relación de Poisson.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de K_I a temperatura ambiente y los valores a $-100 \text{ }^\circ\text{C}$. En ambos casos se exploraron las teorías de Deformación unitaria plana y Esfuerzo plano con la finalidad de obtener el porcentaje de variación de dichas teorías.

Tabla 1. Porcentaje de variación de resultados de K_I para las teorías DP y EP

a (mm)	K_I Temperatura ambiente ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)			K_I -100°C ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)		
	Deformación unitaria plana	Esfuerzo plano	% Variación	Deformación unitaria plana	Esfuerzo plano	% Variación
1	178,51	178,36	0,0840	163,7904	163,7681	0,0136
2	251,55	251,46	0,0357	240,4962	240,4631	0,0137
3	308,19	308,11	0,0259	297,7320	297,7022	0,0100
4	356,41	356,34	0,0196	345,8759	345,8508	0,0072
5	399,25	399,18	0,0175	388,5068	388,4826	0,0062
6	438,49	438,42	0,0159	427,4292	427,4051	0,0056
7	475,1	475,03	0,0147	463,6738	463,6518	0,0047
8	509,8	509,73	0,0137	497,9478	497,9365	0,0022
9	542,96	542,89	0,0128	530,7263	530,7012	0,0047
10	575,05	574,98	0,0121	562,397	562,3673	0,0052
11	606,31	606,24	0,0115	593,1886	593,1698	0,0031
12	636,96	636,89	0,0109	623,4143	623,3867	0,0044
13	667,21	667,14	0,0104	653,2302	653,2063	0,0036
14	697,26	697,18	0,0114	682,8012	682,7833	0,0026
15	727,2	727,13	0,0096	712,3001	712,2791	0,0029
16	757,24	757,17	0,0092	741,8721	741,8606	0,0015
17	787,49	787,41	0,0101	771,6236	771,6087	0,0019
18	818,04	817,97	0,0085	801,7084	801,6941	0,0017
19	849,08	849,00	0,0094	832,2425	832,2206	0,0026
20	880,73	880,65	0,0090	863,369	863,3575	0,0013

Como se observa en la Tabla 1, los valores resultantes del porcentaje de variación son menores al 1% en las dos teorías exploradas (DP y EP) para los casos de temperatura ambiente y a $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ con aumento de longitud de grieta $a = 1 \text{ mm}$ hasta $a = 20 \text{ mm}$.

En la Tabla 2 se exponen los resultados obtenidos de G a temperatura ambiente y los valores a $-100 \text{ }^\circ\text{C}$. En ambos casos se exploraron las teorías de Deformación unitaria plana y Esfuerzo plano con la finalidad de obtener el porcentaje de variación de dichas teorías.

Como se observa en la Tabla 2, los valores resultantes del porcentaje de variación están alrededor del 7.8% en las dos teorías exploradas (DP y EP) para los casos de temperatura ambiente y a $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ con aumento de longitud de grieta $a = 1 \text{ mm}$ hasta $a = 20 \text{ mm}$.

Tabla 2. Porcentaje de variación de resultados de G para las teorías DP y EP

a (mm)	G Temperatura ambiente (J/mm)			G -100 °C (J/mm)		
	Deformación unitaria plana	Esfuerzo plano	% Variación	Deformación unitaria plana	Esfuerzo plano	% Variación
1	0,1236	0,1341	7,8299	0,1059	0,1149	7,8328
2	0,2665	0,2891	7,8173	0,2283	0,2477	7,8320
3	0,4084	0,4431	7,8311	0,3500	0,3797	7,8219
4	0,5512	0,5980	7,8260	0,4723	0,5124	7,8259
5	0,6955	0,7546	7,8319	0,5959	0,6466	7,8410
6	0,8418	0,9133	7,8287	0,7213	0,7826	7,8328
7	0,9906	1,0749	7,8425	0,8489	0,9210	7,8284
8	1,1426	1,2397	7,8325	0,9790	1,0623	7,8414
9	1,2979	1,4082	7,8326	1,1122	1,2067	7,8312
10	1,4574	1,5813	7,8353	1,2489	1,3550	7,8302
11	1,6215	1,7593	7,8326	1,3894	1,5075	7,8341
12	1,7908	1,9431	7,8379	1,5346	1,6650	7,8318
13	1,9662	2,1334	7,8372	1,6849	1,8281	7,8332
14	2,1484	2,3310	7,8335	1,8409	1,9974	7,8351
15	2,3380	2,5368	7,8366	2,0034	2,1737	7,8345
16	2,5361	2,7517	7,8351	2,1732	2,3580	7,8371
17	2,7437	2,9769	7,8336	2,3510	2,5509	7,8364
18	2,9618	3,2136	7,8354	2,5379	2,7537	7,8367
19	3,1916	3,4630	7,8371	2,7349	2,9674	7,8351
20	3,4349	3,7270	7,8374	2,9433	3,1936	7,8375

En la Tabla 3 se muestra una comparación de los resultados obtenidos de K_I a temperatura ambiente y los valores a -100 °C derivados de los análisis desarrollados. Así como, la obtención del porcentaje de variación correspondientes a cada uno de ellos.

Tabla 3. Porcentaje de variación de resultados de K_I a temperatura ambiente frente a los valores a -100 °C

a (mm)	K_I Deformación unitaria plana (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)			K_I Esfuerzo plano (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)		
	% Variación		% Variación	% Variación		% Variación
	Temperatura ambiente	-100 °C		Temperatura ambiente	-100 °C	
1	178,51	163,7904	8,2458	178,36	163,7681	8,1811
2	251,55	240,4962	4,3942	251,46	240,4631	4,3732
3	308,19	297,7320	3,3933	308,11	297,7022	3,3779
4	356,41	345,8759	2,9556	356,34	345,8508	2,9435
5	399,25	388,5068	2,6908	399,18	388,4826	2,6798
6	438,49	427,4292	2,5224	438,42	427,4051	2,5124
7	475,1	463,6738	2,4050	475,03	463,6518	2,3952
8	509,8	497,9478	2,3248	509,73	497,9365	2,3136
9	542,96	530,7263	2,2531	542,89	530,7012	2,2451
10	575,05	562,397	2,2003	574,98	562,3673	2,1935
11	606,31	593,1886	2,1641	606,24	593,1698	2,1559
12	636,96	623,4143	2,1266	636,89	623,3867	2,1201
13	667,21	653,2302	2,0952	667,14	653,2063	2,0885
14	697,26	682,8012	2,0736	697,18	682,7833	2,0649
15	727,2	712,3001	2,0489	727,13	712,2791	2,0423
16	757,24	741,8721	2,0294	757,17	741,8606	2,0219
17	787,49	771,6236	2,0148	787,41	771,6087	2,006
18	818,04	801,7084	1,9964	817,97	801,6941	1,9897
19	849,08	832,2425	1,9830	849,00	832,2206	1,9763
20	880,73	863,369	1,9712	880,65	863,3575	1,9636

Como se observa en la Tabla 3, los valores resultantes del porcentaje de variación van de 1,9 hasta 8,2% en las dos teorías exploradas (DP y EP) para los casos de temperatura ambiente y a -100 °C.

Por tal motivo para tener una perspectiva más visual del comportamiento de K_I en una placa agrietada con aumento de longitud de grieta $a = 1$ mm hasta $a = 20$ mm, se presentan en las Figuras 7 y 8 los resultados de la Tabla 3.

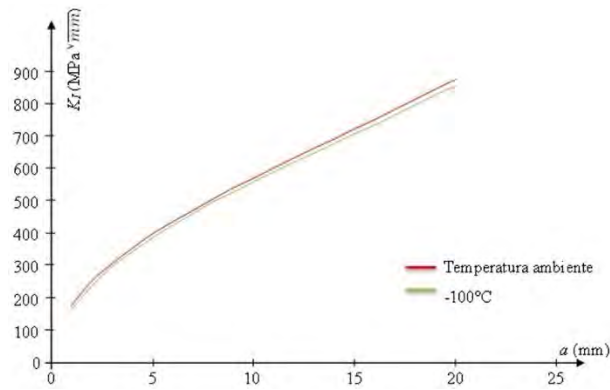


Figura 7. Comportamiento de los valores de K_I a temperatura ambiente y a -100°C . Deformación unitaria plana

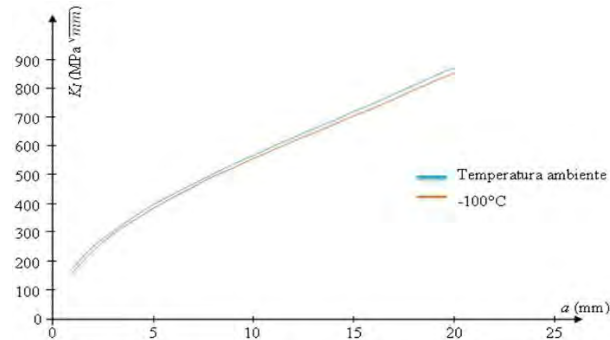


Figura 8. Comportamiento de los valores de K_I a temperatura ambiente y a -100°C . Esfuerzo plano

En la Tabla 4 se muestra un cotejo de los resultados obtenidos de G a temperatura ambiente y los valores a -100°C derivados de los análisis desarrollados. Así como, la obtención del porcentaje de variación correspondientes a cada uno de ellos.

Tabla 4. Porcentaje de variación de resultados de G a temperatura ambiente frente a los valores a -100°C

a (mm)	G Deformación unitaria plana (J/mm)		% Variación	G Esfuerzo plano (J/mm)		% Variación
	Temperatura ambiente	-100°C		Temperatura ambiente	-100°C	
1	0,1236	0,1059	14,3203	0,1341	0,1149	14,3176
2	0,2665	0,2283	14,3339	0,2891	0,2477	14,3203
3	0,4084	0,3500	14,2997	0,4431	0,3797	14,3082
4	0,5512	0,4723	14,3142	0,5980	0,5124	14,3143
5	0,6955	0,5959	14,3206	0,7546	0,6466	14,3122
6	0,8418	0,7213	14,3145	0,9133	0,7826	14,3107
7	0,9906	0,8489	14,3044	1,0749	0,9210	14,3176
8	1,1426	0,9790	14,3182	1,2397	1,0623	14,3099
9	1,2979	1,1122	14,3077	1,4082	1,2067	14,3090
10	1,4574	1,2489	14,3062	1,5813	1,3550	14,3110
11	1,6215	1,3894	14,3139	1,7593	1,5075	14,3125
12	1,7908	1,5346	14,3064	1,9431	1,6650	14,3121
13	1,9662	1,6849	14,3067	2,1334	1,8281	14,3104
14	2,1484	1,8409	14,3129	2,3310	1,9974	14,3114
15	2,3380	2,0034	14,3113	2,5368	2,1737	14,3133
16	2,5361	2,1732	14,3093	2,7517	2,3580	14,3075
17	2,7437	2,3510	14,3127	2,9769	2,5509	14,3101
18	2,9618	2,5379	14,3122	3,2136	2,7537	14,3110
19	3,1916	2,7349	14,3094	3,4630	2,9674	14,3112
20	3,4349	2,9433	14,3119	3,7270	3,1936	14,3117

Se observa que los valores del porcentaje de variación están alrededor del 14.3% en las dos teorías exploradas (DP y EP) para los casos de temperatura ambiente y a -100°C y al igual que el caso anterior para tener una perspectiva más visual del comportamiento de G en una placa agrietada con aumento de longitud de grieta $a = 1\text{ mm}$ hasta $a = 20\text{ mm}$, se presentan en las Figuras 9 y 10 los resultados de la Tabla 4.

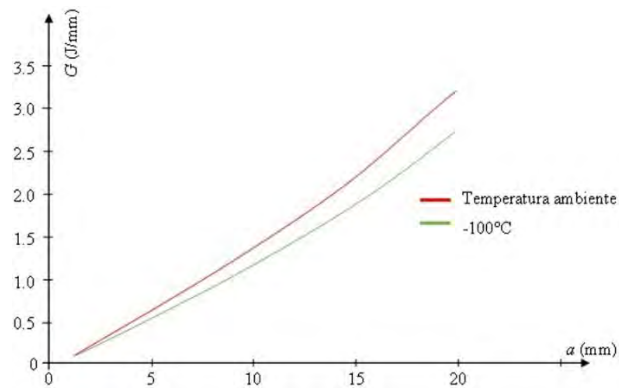


Figura 9. Comportamiento de los valores de G a temperatura ambiente y a $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Deformación unitaria plana

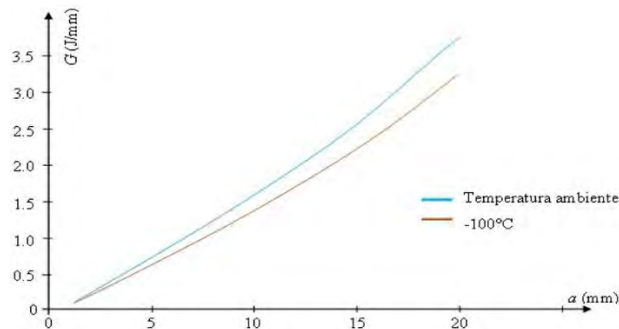


Figura 10. Comportamiento de los valores de G a temperatura ambiente y a $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esfuerzo plano

5. CONCLUSIONES

La variación en los resultados obtenidos por un estado de Deformación unitaria plana del Factor de Intensidad de Esfuerzos K_I a temperatura ambiente y a $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ son mínimos (menores al 1%) al compararlos con los valores de la teoría del Esfuerzo plano, esto hace notar que siguiendo las consideraciones presentadas en este trabajo es indistinto el uso de estas teorías.

La variación de los resultados derivados de los análisis por medio de la teoría de la Deformación unitaria plana de la tasa de liberación de energía G a temperatura ambiente y a $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, son significativos (alrededor de 7.8%) al ser cotejados a los valores del estado de Esfuerzo plano, resaltando que es importante elegir la teoría de elasticidad adecuada para la obtención de G .

Al realizar una comparación del comportamiento de los resultados de K_I a temperatura ambiente frente a una temperatura de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, se ve claramente una disminución del valor de K_I debido a una temperatura baja, con porcentajes de variación mayor en las longitudes de 1, 2 y 3 mm y un porcentaje de variación menor en las longitudes de grietas 18, 19 y 20 mm para ambas teorías de elasticidad. No obstante, visualmente el comportamiento es sumamente semejante para todos los casos presentados.

Al cotejar el comportamiento de los resultados de G a temperatura ambiente contra una temperatura de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, se nota una disminución considerable en el valor de G debido a una baja temperatura, con un porcentaje de variación prácticamente constante para todas las longitudes de grietas y las teorías de elasticidad presentadas. Sin embargo, visualmente la disminución de los valores es más evidente para longitudes de grieta posteriores a 10mm.

Se puede comprobar que hay una variación del Factor de Intensidad de Esfuerzos K debido a la disminución de la temperatura, con ayuda del criterio de crecimiento global de las grietas en términos de la tasa de liberación de energía G , esto a pesar de que el criterio de crecimiento de esfuerzos local representado por K depende únicamente de la geometría del cuerpo, el tamaño de la grieta, así como de la carga y las condiciones de frontera. Todo esto debido a que la baja temperatura produce cambios en las propiedades mecánicas del material y se manifiesta en la alteración del módulo de elasticidad y deriva en otros parámetros como lo son G y K .

REFERENCIAS

- [1] Singiresu S. (2010). The finite element method in engineering. Elsevier.
- [2] Bathe K. (1996). Finite Element Procedures. Prentice Hall.
- [3] Cook R. (1995). Finite Element Modeling for Stress Analysis. John Wiley and Sons.
- [4] Sun C. y Jim Z. (2011). Fracture Mechanics. Academic Press.
- [5] Hernández H. y Espejo E. (2002). Mecánica de Fractura y Análisis de Falla. Universidad Nacional de Colombia.
- [6] Arana J. y González J. (2002). Mecánica de la Fractura. Universidad del País Vasco.
- [7] Perez N. (2017). Fracture Mechanics. Springer.
- [8] Jia Y. y Jian X. (2017). Experimental studies on mechanical properties of steel reinforcements under cryogenic temperatures, Construction and Building Materials 151, 661-672.

Simulaciones Híbridas en Tiempo-Real SHTR aplicadas en la evaluación del desempeño dinámico de muros delgados de concreto reforzado afectados en una edificación aislada

Bryan Castillo Torres¹
Sharick Melisa Vides Quintero²
Andry Fernanda Hoyos Triviño³
Peter Thomson⁴
Johannio Marulanda Casas⁵
Universidad del Valle
Colombia

El Sistema Industrializado SI en Latinoamérica, en especial en Colombia, ha aumentado su implementación debido a sus ventajas técnicas y de minimización de costos económicos directos. Esta tecnología constructiva consiste en edificaciones de muros delgados de concreto reforzado MDCR con una cuantía importante de muros por metro cuadrado. Sin embargo, diferentes investigaciones han reportado susceptibilidad cuando es sometido a cargas sísmicas, dado que su desempeño estructural presenta baja ductilidad, inestabilidad fuera del plano y presencia de fallas frágiles, entre otros aspectos. Por ello se ha planteado la necesidad de la implementación de técnicas de control estructural con el fin de disminuir la vulnerabilidad sísmica en este tipo de sistema constructivo, donde la técnica de aislamiento en la base se presenta como una alternativa confiable, accesible y aplicable para la disminución de la vulnerabilidad de estas estructuras ante un evento sísmico. La pérdida de capacidad de desempeño de algunos elementos estructurales, al ser sometidos a sismos, es uno de los enfoques de estudio característicos de la ingeniería estructural para determinar integralmente la capacidad de resistencia de la estructura ante replicas sísmicas o eventuales rehabilitaciones. Convencionalmente para analizar edificaciones aisladas se emplea software de elementos finitos que constituye modelos numéricos simplificados, aplicando teorías limitadas sobre el comportamiento de los elementos estructurales, que difieren de su comportamiento real. Con el fin de considerar una dinámica completa de los MDCR afectados, se implementó una técnica experimental conocida como Simulación Híbrida en Tiempo-Real SHTR. Esta metodología de trabajo divide dinámicamente la edificación de MDCR en un componente numérico, correspondiente a un modelo de la estructura aislada sin los muros afectados, y en un componente experimental, en el que se emplea una probeta a escala real de un MDCR afectado cíclicamente. Se utilizó como sistema de transferencia el Marco de Pruebas y Homologaciones MaP-H de la Universidad del Valle. Se obtuvo una evaluación fiable y precisa de la SHTR con valores de amplitud generalizada A_0 cercanos a 1,0, errores menores al 1,8% y *delay* en el tiempo menores a 8,0 ms, para los dos eventos sísmicos evaluados, el Centro y Kobe, con aceleraciones de $6,80 \text{ m/s}^2$ (0,70 g) y $9,81 \text{ m/s}^2$ (1,00 g) en ambos casos. Lo anterior permitió determinar el comportamiento histerético del MDCR en condiciones operativas de la edificación aislada.

¹ Especialista en Estructuras.

Contacto: bryan.castillo@correounivalle.edu.co

² Especialista en Estructuras.

Contacto: sharick.vides@correounivalle.edu.co

³ Ingeniera Civil.

Contacto: andry.hoyos@correounivalle.edu.co

⁴ Doctor en Ingeniería.

Contacto: peter.thomson@correounivalle.edu.co

⁵ Doctor en Ingeniería.

Contacto: johannio.marulanda@correounivalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la ingeniería estructural se ha volcado a la gestión de una infraestructura civil resilientes con el objetivo de garantizar la seguridad de sus ocupantes y un desempeño estructural óptimo [1]. Lo anterior se fundamenta aún más si tenemos en cuenta que según el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 las condiciones geológicas y sismológicas del país implican que el 87% de la población se encuentra en zonas de riesgo sísmico considerable [2]. Este nuevo enfoque integral procura sistemas estructuras capaces de recuperarse, de forma eficiente, luego de estar expuestas a cargas dinámicas fuertes, como en el caso de un evento sísmico o secundarios a estos.

La ingeniería estructural latinoamericana se ha encaminado a involucrar las ventajas técnicas y económicas en los desarrollos constructivos debido al creciente requerimiento de vivienda en las grandes urbes en expansión, las cuales han impulsado al sector de la construcción [3]. Con estas directrices, la implementación del Sistema Industrializado SI, que consiste en edificaciones de muros delgados de concreto reforzado MDCR con altos rendimientos en su ejecución debido a su proceso constructivo óptimo, que involucran formaletas metálicas modulares y reducción en la mano de obra respecto a sistemas constructivos tradicionales [4]; ha generado una acogida importante en la Industria de la construcción colombiana.

Las edificaciones con este sistema se caracterizan por presentar muros de bajo espesor entre 80 a 150 *mm*, con refuerzo electrosoldado en el alma, dispuesto generalmente en una sola capa y con cuantías de refuerzo típicas de 0.25%, correspondientes a las mínimas exigidas en la NSR-10 [1, 5]; además, se utilizan concretos de alta fluidez y se mezclan con aditivos acelerantes para obtener la resistencia de diseño a edades tempranas, lo que permite a menudo fundiciones monolíticas entre muros y losas de un piso completo en un solo día [6, 7].

Los MDCR en ocasiones requieren de elementos de borde conformados de refuerzo longitudinal con acero convencional dúctil confinado por ganchos o estribos cerrados y conservando el espesor del alma. Las losas de entrepiso son placas macizas de concreto reforzado, con espesores característicos de 100 a 200 *mm*, y con malla electrosoldada que conforma su refuerzo. Esta tecnología se ha posicionado como el segundo sistema estructural más empleado en Colombia (34.5%) para la construcción de vivienda en las principales ciudades del país y se ha constituido como una alternativa eficiente para abordar el déficit habitacional regional [8].

Sin embargo, luego de los sismos de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011), diferentes investigaciones han reportado, incluso para espesores de muro mayores, que el desempeño estructural de estos muros puede ser limitado al presentar baja ductilidad, baja capacidad de disipación de energía, inestabilidad fuera del plano, presencia de fallas frágiles, entre otros aspectos [9-12]. Adicionalmente, a nivel local las edificaciones de MDCR presentan altas relaciones de esbeltez y refuerzos en una sola capa, incrementando su susceptibilidad a inestabilidades fuera del plano [5, 13]. También, se presentan configuraciones de acero inadecuadas y utilización de materiales de baja ductilidad, aumentando las condiciones de inestabilidad fuera del plano [10, 14]; A lo anterior se suma, el inadecuado confinamiento en zonas extremas para resistir las altas demandas a flexo-compresión; generando dificultades constructivas y limitaciones en la capacidad de deformaciones internas en los MDCR [15].

Debido a las limitaciones del comportamiento dinámico de edificaciones con SI y a las condiciones de riesgo sísmico presentes en Colombia se genera la necesidad de implementar mecanismos de control que reduzcan la vulnerabilidad sísmica de este tipo de estructuras. Debido a lo anterior, se han realizado múltiples estudios y aplicaciones que han comprobado la efectividad de los sistemas de control para reducir esta problemática [16].

Sin embargo, son pocas las investigaciones que se centran en determinar el comportamiento dinámico de MDCR afectados ante posibles eventos sísmicos en edificaciones aisladas. Convencionalmente, para el análisis de estructuras aislada se utilizan modelos numéricos con histéresis simplificadas para una condición de deformación específica en los aisladores y condiciones de linealidad en los elementos

estructurales. Con el fin de considerar la dinámica práctica de los MDCR afectados, se implementa una técnica experimental conocida como: Simulación Híbrida en Tiempo-Real SHTR [17]. Esta metodología permite, mediante sub estructuración dinámica, dividir el sistema estructural en un componente numérico y uno experimental; correspondiente a un modelo de la estructura aislada sin los muros afectados; y a una probeta a escala real de un MDCR afectado. La interacción entre ambas subestructuras se realiza en cada paso de tiempo permitiendo la interacción constante entre el componente experimental en la subestructura numérica [18].

2. MÉTODO

2.1 Simulación Híbrida en Tiempo-Real SHTR

Una novedosa e innovadora técnica de evaluación del comportamiento dinámico de sistemas estructurales se ha destacado en las últimas dos décadas, denominada en la literatura como Simulaciones Híbridas SH [17, 19-21]. Esta metodología de pruebas consiste en acoplar las pruebas experimentales con los análisis numéricos. Las SH consisten en subestructura dinámicamente el sistema a evaluar en un componente experimental, que generalmente expone un comportamiento altamente no-lineal, y un componente numérico, que presenta un comportamiento predecible o con un interés bajo por evaluar.

Ambas subestructuras son entrelazadas de forma continua mediante la implementación de sistemas de transferencias, con la función de reproducir las condiciones de borde en la interfaz entre el componente numérico y el experimental, y sensores que proveen los medios para la interacción entre ambas subestructuras, formando un bucle para resolver la respuesta dinámica del sistema en cada paso de tiempo [22-24], como se esquematiza en la sub estructuración de una edificación ante un evento sísmico (Figura 1).

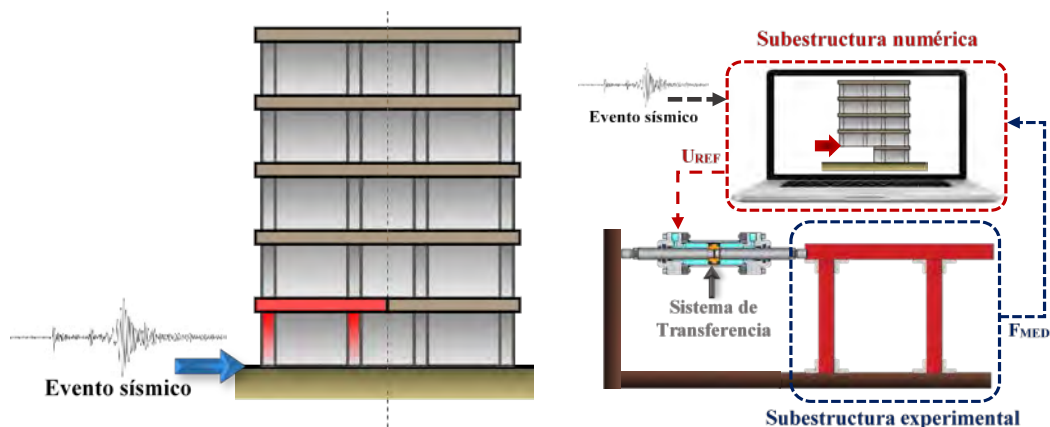


Figura 1. Esquema de Simulación Híbrida: a) Edificación con carga sísmica; b) Subestructuración dinámica de un pórtico de una edificación ante un evento sísmico

Las SH tienen el potencial, dada su versatilidad, de simular la respuesta dinámica de especímenes a gran escala lo que las hace una técnica robusta de evaluación de sistemas estructurales civiles en general [25, 26]. La ventaja de esta técnica radica en su optimización de recursos, concentrándolos en el componente crítico a evaluar del sistema generando menores costos, altos rendimientos en tiempo y mayor desempeño frente a las limitaciones de capacidad de la experimentación tradicional a gran escala (STT, ensayos cuasi-estáticos, etc.). Además, las SH han mostrado un desempeño óptimo en la fiabilidad y precisión en las respuestas dinámicas simuladas del sistema estructural completo.

Las SH que modelan analíticamente los efectos inerciales, empleando representaciones numéricas del sistema, son conocidas comúnmente como ensayos Pseudo-dinámicos PSD [27-29]. Los ensayos PSD evalúan la componente de rigidez del elemento experimental para la calibración o validación de modelos numéricos como histéresis. Cuando se introduce el concepto de sub estructuración se genera como resultado los ensayos Pseudo-Dynamic Hybrid Simulation PSDHS, donde la subestructura experimental contiene la rigidez y amortiguamiento, y la parte numérica lo restante [25]. El desempeño de esta técnica es válido para una gran variedad de estructuras construidas en materiales convencionales como acero,

concreto o madera, siempre que los cambios de carga permanezcan en un nivel producido por los eventos sísmicos. Lo anterior es una de las razones por la cual esta metodología tiene gran acogida [21, 30]. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado una gran variedad de dispositivos de control con el fin de disminuir la vulnerabilidad de las estructuras y mitigación de la respuesta dinámica ante cargas dinámicas, en los cuales su desempeño depende directamente de la velocidad [31]. Infortunadamente, las pruebas PSD convencionales o las PSDHS no son aplicables para simular la respuesta sísmica de estructuras con tales tecnologías debido a que las cargas generalmente son aplicadas en escalas de tiempo muy amplias. Por lo tanto, los efectos dinámicos dependientes de los cambios de tiempo en las tecnologías emergentes son eliminados [25, 32-34].

Ante las limitaciones presentadas por las pruebas PSD o PSDHS, una serie de investigaciones recientes, plantean la utilización de pruebas de SHTR. Las cuales, conservan el concepto de sub estructuración dinámica como en las SH (Subestructura numérica y experimental) pero con una interacción constante en la interfaz entre los dos subsistemas debido a su ejecución en Tiempo-Real [20, 30]. Las SHTR se destacan por su capacidad de inducir las velocidades correspondientes de la interfaz a los dispositivos o elementos evaluados experimentalmente, lo que permite realizar investigaciones de ingeniería sísmica para la evaluación de respuestas de elementos localizados y evaluar el desempeño del sistema global [25, 35].

Basados en la técnica de SHTR se evaluó dinámicamente la edificación de MDCR aislada con un porcentaje de sus muros afectados cíclicamente. Se realizó una retroalimentación constante a una frecuencia de 1024 Hz, utilizando el Marco de Pruebas y Homologaciones de la Universidad del Valle, con un seguimiento con control robusto, como sistema de transferencia; garantizando una interacción estable entre las subestructuras experimentales (MDCR afectado) y numéricas (Estructura aislada restante). Este planteamiento permitió determinar la resistencia residual experimental aportada por los muros afectados cíclicamente y su condición de degradación durante dos eventos sísmicos; además, se evaluó numéricamente la respuesta de la estructura MDCR aislada bajo estas condiciones sísmicas [36].

2.2 Estructura de referencia

La estructura de referencia corresponde a una edificación de baja altura típica en Colombia, construida en la ciudad de Santiago de Cali, diseñada con el SI de MDCR, y a la cual, para disminuir la vulnerabilidad sísmica del sistema en esta investigación se le implementó un sistema de aislamiento sísmico de acuerdo con el procedimiento estipulado en el FEMA 450 [37] y las recomendaciones realizadas por [38]. Esta edificación está compuesta de MDCR, losas de entrepiso con espesor de 80-100 mm; se disponen concreto de peso normal con resistencias de 21 MPa y una densidad volumétrica de muros en planta promedio de 2.0% y 2.5% para las direcciones longitudinales y transversales. La edificación consta de seis losas con alturas entre piso de 2,5 m y dimensiones en planta de 16.5 m y 13.7 m en las direcciones X y Y, respectivamente, Figura 3. Con el fin de alcanzar una distribución de carga uniforme en la base se dispuso una losa maciza de 100 mm de espesor, vigas de 400x500 mm y 400x400 mm las cuales cimentan los muros y transmiten la carga a los 12 aisladores elastómericos, como se muestra en la Figura 3b.

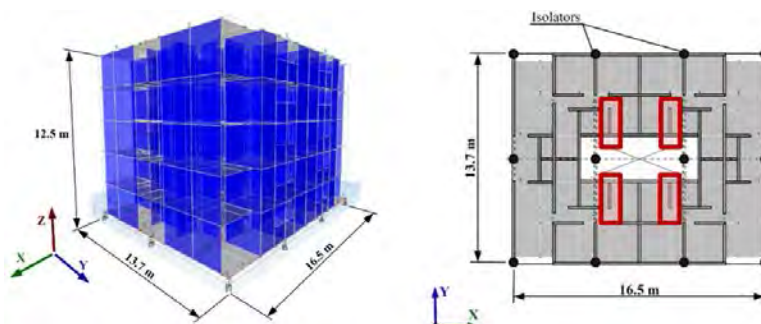


Figura 2. Estructura de referencia: a) Isometría estructural; b) Planta estructural

La evaluación del comportamiento dinámico se realizó en el software ETABS19 utilizando elementos tipo *Shell-membrane* para losas, *Shell-Thin* para muros y *Frame* para las vigas, y con la suposición de diafragma rígido en las losas. En la condición de base fija se consideró un porcentaje de amortiguamiento estructural

$\zeta = 5\%$ y las frecuencias en las direcciones X y Y, en los dos primeros modos, fueron de 4,46 y 4,77 Hz, respectivamente. Mientras que, para la condición aislada se alcanzó el periodo objetivo de 1.90 s, desarrollando un comportamiento de cuerpo rígido en la superestructura soportada sobre el sistema de aislamiento. Teniendo en cuenta que para la estructura aislada se supuso el porcentaje de amortiguamiento estructural $\zeta = 0\%$, utilizando únicamente el amortiguamiento suministrado por el comportamiento histerético de los aisladores.

El sistema de aislamiento se diseñó a partir de las normas y recomendaciones anteriormente mencionadas. Utilizando el espectro de diseño de la micro zona No.1 de la ciudad de Santiago de Cali [39] con una Pseudoaceleración máxima de 0,75 g, un periodo objetivo de 1.90 s y una deformación de diseño del 100%. Se contemplaron 62 capas de caucho y 61 capas de fibra con espesores de $t_r = 5,5 \text{ mm}$ y $t_f = 1.0 \text{ mm}$, respectivamente, alcanzando una altura total de $H = 400 \text{ mm}$ y un diámetro 910 mm. Estos aisladores diseñados se implementaron en el software ETABS19 considerando un comportamiento no-lineal para los grados de libertad longitudinales X y Y [40], con un modelo de histéresis bilineal.

2.3 Subestructura Numérica SN

Con el objetivo de proponer un modelo analítico más versátil para conformar la SN se implementó un modelo de un pórtico a cortante en espacio de estados ajustado con las respuestas simuladas de la edificación aislada en ETABS19, analizando el eje Y de esta estructura. Incluyendo, además, un modelo tipo *Bouc-Wen extendido* para representar el comportamiento histerético altamente no-lineal del sistema aislado, como se utilizó en [36] para este tipo de aislamiento. El modelo estructural propuesto se conforma como un pórtico a cortante de 6-GDL traslacionales ajustados para un análisis de excitación en la base sinusoidal con amplitud constante para frecuencias entre 0.1-20 Hz. El modelo planteado y la distribución de masa utilizada se muestra en la Figura 3a y 3b, respectivamente; además, los valores de estas propiedades son registrados en la Tabla 1.

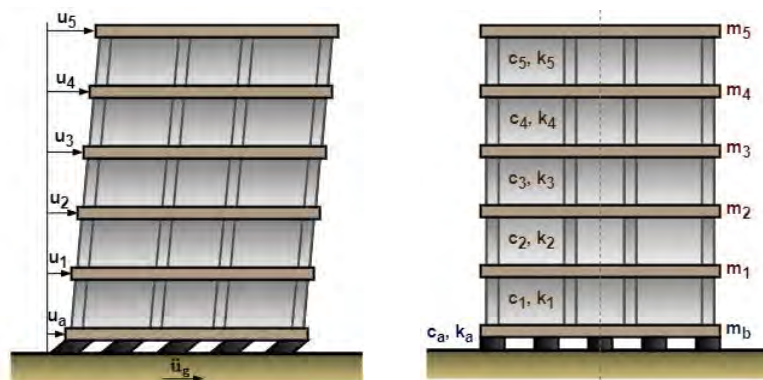


Figura 3. Modelo numérico de la edificación aislada: a) GDL del Modelo; b) Masas y rigideces por piso

Tabla 1. Valores de propiedades físicas de la edificación aislada.

Nivel de Piso	Masa M_i (Ton)	Rigidez K_i (KN/m)	Amortiguamiento C_i (KN*s/m)
Base Aislada	171,91		BW*
No. 1	159,83	3091,80*1e3**	3549,80*1e3
No. 2	159,88	1787,00*1e3	2186,70*1e3
No. 3	159,88	1197,72*1e3	1571,00*1e3
No. 4	159,88	845,42*1e3	1202,90*1e3
No. 5	138,83	470,45*1e3	769,02*1e3

*BW → Propiedad variable en modelo Bouc-Wen.

**No tiene en cuenta la rigidez de MDCR afectados, Figura 2b

La ecuación de movimiento que simula el comportamiento dinámico de la estructura se presenta en la ecuación (1), donde: M_r , C_r y K_r son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez representativas del modelo simplificado de 6-GDL; y X , \dot{X} y \ddot{X} corresponden a los estados de desplazamiento, velocidad y aceleración relativos. Aplicando sub estructuración dinámica [28, 29] se extrajo la acción del sistema aislado, del modelo numérico de la edificación aislada, para ser incluido como una fuerza entrante mediante el

modelo numérico de *Bouc-Wen extendido*; adicionalmente, se realiza esta misma metodología para extraer las propiedades de los MDCR afectados del modelo numérico de la edificación aislada e incluirlo como una fuerza entrante en este sistema. Lo anterior permite una retroalimentación del modelo numérico de la edificación aislada con la fuerza medida experimentalmente de los MDCR afectados $\Gamma_{MDCR}F_{MDCR}$ y del modelo del sistema de aislamiento $\Gamma_{Ais}F_{Ais}$, como se plantea en la ecuación (2).

$$M_r\{\ddot{x}\} + C_r\{\dot{x}\} + K_r\{x\} = -M_r\Gamma_g a_g \quad (1)$$

$$M_n\{\ddot{x}\} + C_n\{\dot{x}\} + K_n\{x\} = -M_r\Gamma_g a_g - \Gamma_{Ais}F_{Ais} - \Gamma_{MDCR}F_{MDCR} \quad (2)$$

Las fuerzas restauradoras del sistema, producto de la fuerza experimental registrada de los MDCR afectados, está determinada por el término $\Gamma_{MDCR}F_{MDCR}$, donde el vector de influencia $\Gamma_{MDCR} = [1 - 1 0 0 0]^T$ indica los GDL donde es aplicada. De igual forma, a_g representa la aceleración del suelo y el vector $\Gamma_g = [1 1 1 1 1]^T$ especifica la incidencia del sismo en los GDL. Finalmente, el término $\Gamma_{Ais}F_{Ais}$ indica la fuerza del modelo numérico de aislamiento y $\Gamma_{Ais} = [1 0 0 0 0]^T$ el GDL de incidencia. Con lo anterior, se plantea el espacio de estados, como se muestra en las ecuaciones 3 y 4, para tres entradas en el sistema y 6-GDL de salida.

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix}_{[12 \times 1]} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_n^{-1}K_n & -M_n^{-1}C_n \end{bmatrix}_{[12 \times 12]} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}_{[12 \times 1]} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\Gamma_g & -M_n^{-1}\Gamma_{MDCR} & -M_n^{-1}\Gamma_{Ais} \end{bmatrix}_{[12 \times 18]} \begin{Bmatrix} a_g \\ F_{MDCR} \\ F_{Ais} \end{Bmatrix}_{[18 \times 1]} \quad (3)$$

$$\{U\}_{[6 \times 1]} = [0 \quad I]_{[6 \times 12]} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}_{[12 \times 1]} + [0 \quad 0 \quad 0]_{[6 \times 18]} \begin{Bmatrix} a_g \\ F_{MDCR} \\ F_{Ais} \end{Bmatrix}_{[18 \times 1]} \quad (4)$$

El modelo numérico del sistema aislado, como se mencionó anteriormente, se optimizó y ajustó a partir de un modelo histerético tipo *Bouc-Wen* extendido con señales experimentales de la caracterización dinámica de un par de aisladores elastómericos no-conectados a escala en el Marco de pruebas de Aisladores a escala de la Universidad del valle. Las probetas de aisladores y sus dimensiones, junto con el protocolo de ensayo al que fueron sometidos y el Marco de pruebas donde se realizaron las pruebas de caracterización son mostrados en la Figura 4.

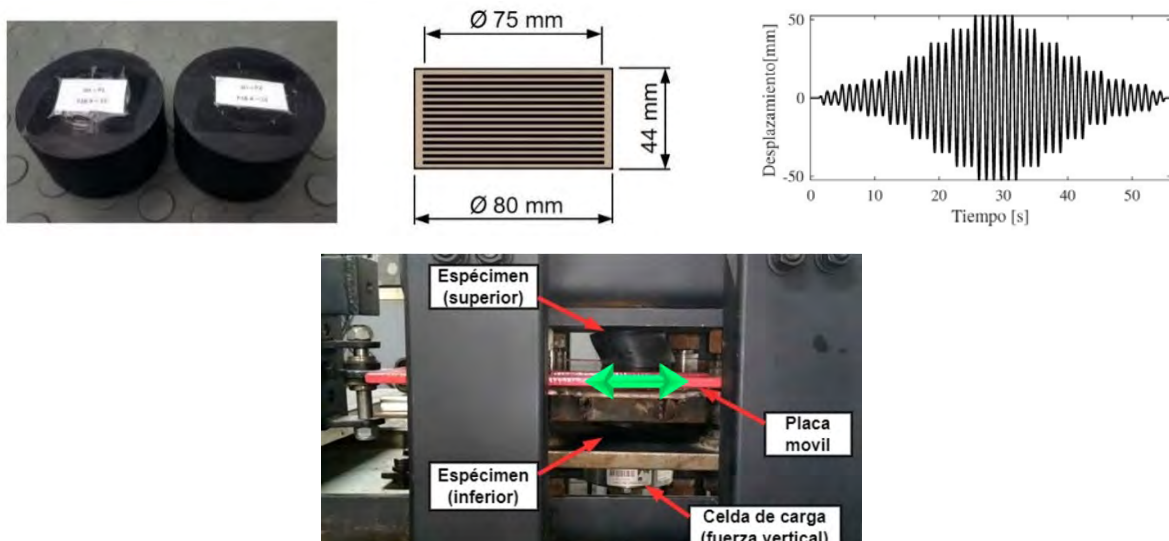


Figura 4. Caracterización de probetas experimentales: a) Probetas de aisladores elastómericos no conectados; b) Protocolo de ensayo; c) Marco de Pruebas de Aisladores a escala

La caracterización de las probetas se realizó mediante la ejecución del protocolo de desplazamiento a cortante (Figura 4b) ejercido por el simulador sísmico unidireccional acoplado al marco de ensayo de aisladores a escala (Figura 4c). De forma simultánea, se ejercía una carga de compresión constante de 19 KN y se registraba la carga a cortante mediante una celda de carga con capacidad de 1,5 ton. Los resultados de las histerésis y los módulos de cortante mostrada por los especímenes se presentan en la Figura 5.

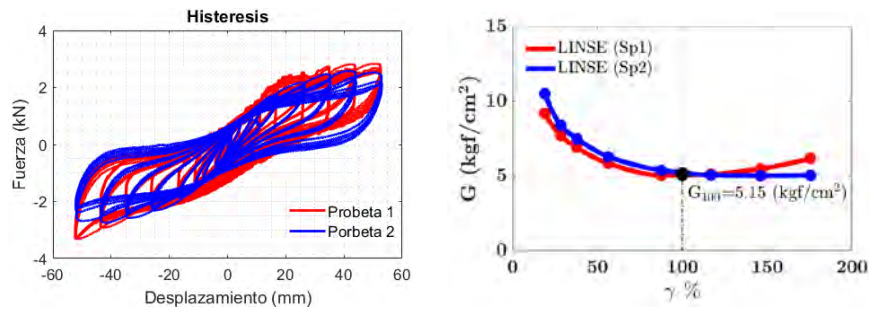


Figura 5. Propiedades mecánicas de los especímenes: a) Histéresis de las probetas de aisladores; b) Módulo a cortante registrado en las probetas

El modelo de *Bouc-Wen extendido* ajustado se formula según las ecuaciones (5) y (6), y sus propiedades son mostradas en la Tabla 2. Igualmente, en la Figura 6 se muestra la bucla típica de este modelo junto con la comparativa del su desempeño de rigidez horizontal, respecto a los resultados de las probetas de aisladores.

$$f_r = s_1 u_a + s_3 u_a^3 + s_5 u_a^5 \quad (5)$$

$$f_d = A \dot{u}_a - \beta \dot{u}_a |z|^n - \gamma |\dot{u}_a| |z|^{n-1} \quad (6)$$

Tabla 2. Constante del modelo Bouc-Wen aumentado para el sistema de aislamiento

b (kN/m)	Ca (kN*s/m)	S ₁ (kN/m)	S ₃ (kN *m ³)	S ₅ (kN *m ³)	A	Y	β	γ	η
457,00	0,936	99,84	-4,211*1e4	9,567*1e6	1,00	0,375	613,40	488,30	1,00

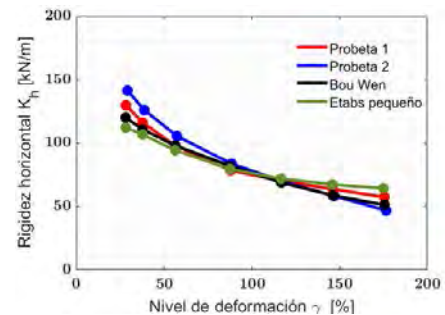
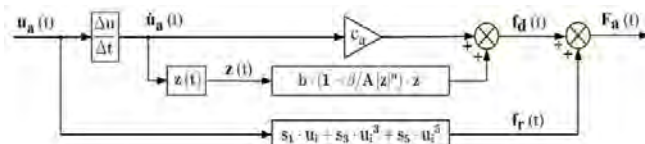


Figura 6. Modelo Bouc-Wen extendido: a) Bucla modelo; b) Rigidez horizontal vs Deformación

2.4 Subestructura Experimental SE

Para la subestructura experimental se implementó un MDCR afectado por un ensayo cíclico realizado por el Grupo de Investigación G7 de la Universidad del Valle, con el fin de simular el comportamiento dinámico real de estos frente a un evento sísmico y, paralelamente, su influencia en la respuesta dinámica de la edificación aislada. Como datos generales de esta probeta se especifica una resistencia del concreto $f'_c = 24.5 \text{ MPa}$, una carga vertical sostenida de 274.58 kN y una relación Momento-Cortante $M/V * L_w = 3.905$, dado por la configuración del Sistema de Transferencia ST empleado.

En la Figura 7, se describe la configuración y la geometría de la probeta de MDCR conformada por una viga superior de $30 \times 32 \text{ cm}^2$, con recubrimiento de $2,5 \text{ cm}$, estribos rectangulares con barras No. 4 cada 23.0 cm y cuatro barras No. 4 para el acero longitudinal; una reducción entre la viga superior y el alma en una longitud de desarrollo de $10,0 \text{ cm}$; una viga de soporte inferior de $40 \times 54 \text{ cm}^2$, con recubrimiento de $3,0\text{-}4,0 \text{ cm}$, estribos rectangulares con barras No. 3 cada $15,0 \text{ cm}$ y una combinación de 4 barras No. 4 y 4 barras No. 5 para el acero longitudinal; se configura estribos de anclaje para la interfaz entre la viga de soporte y el alma con estribos en "L" con barras No. 4; el alma se especifica con espesor de $10,0 \text{ cm}$ con malla electrosoldada MES $\varnothing 7\text{mm}$ cada $15,0 \text{ cm}$, como acero de refuerzo. Adicionalmente, se configuraron elementos de borde como se evidencia en la Figura. 7c; el elemento de borde derecho continua con el espesor de alma y un ancho de $20,0 \text{ cm}$, con estribos tipo gancho de barras No. 2 cada $15,0 \text{ cm}$ y tres barras No. 4 como acero longitudinal, paralelo al alma; y finalmente, para el elemento de borde izquierdo, se

configura una aleta adicional de 10x35 cm², con estribos tipo gancho de barras No. 2 cada 15,0 cm y tres barras No. 4 como acero longitudinal, perpendicular al alma.

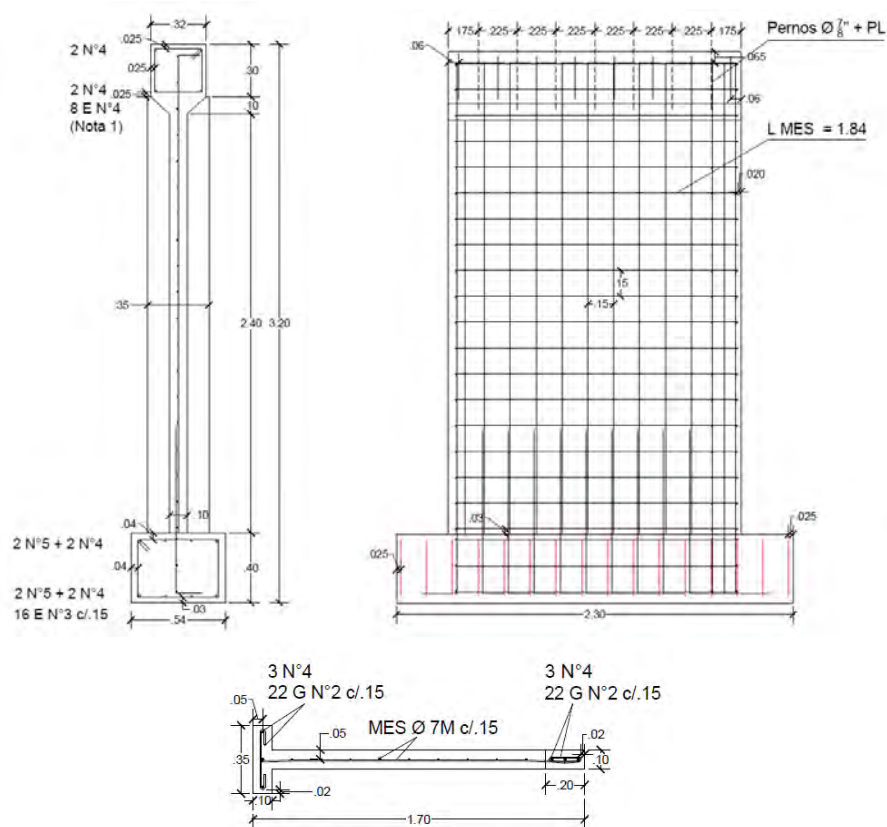


Figura 7. Especificaciones Probeta de MDCR: a) Vista lateral; b) Vista frontal; c) Vista en planta

El estado final de daño registrado del MDCR luego del ensayo cíclico, evidenció una concentración del daño en la zona inferior del muro. Con grietas de gran tamaño en la interfaz del cemento-muro que generó movimientos de cuerpo rígido desde una deriva de 0.6%. Adicionalmente, ocurrió fractura de todos los alambres que componen la malla electrosoldada del alma; pandeo del refuerzo en los extremos del muro, tanto para la aleta como en el extremo libre; y aplastamiento del concreto en los extremos. El desempeño del MDCR alcanzó en ambas direcciones una deriva ultima de 1,40%, definida cuando la resistencia lateral disminuye en 20%. Estos daños estructurales debido al ensayo cíclico se visualizan, mediante material fotográfico del Grupo de Investigación G7, en la Figura 8.

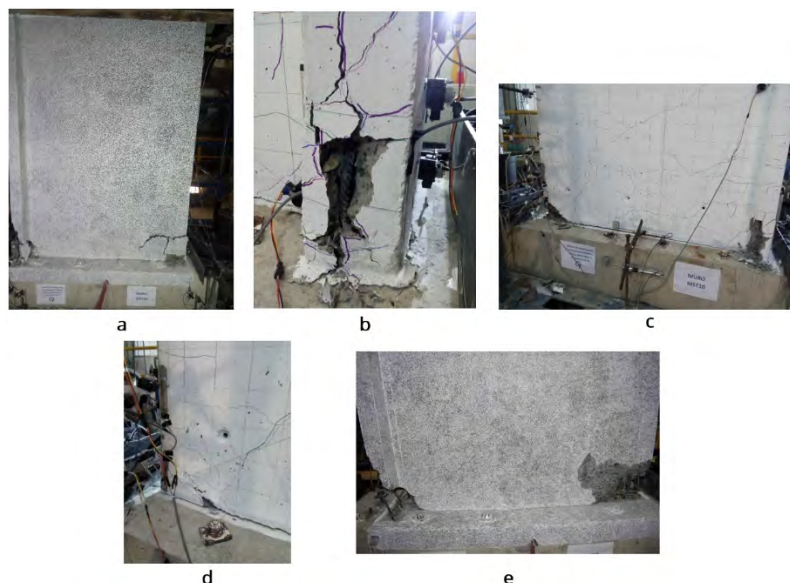


Figura 8. Estado de daño final del MDCR: a) Cara sur; b) Detalle de aleta; c) Cara norte; d) Detalle extremo libre; e) Daño final

A partir de los ensayos de caracterización iniciales de la probeta, con desplazamientos que garanticen un agrietamiento despreciable en el muro se determinó la rigidez inicial del muro. De igual forma, una vez terminada la prueba cíclica y llegado al daño registrado, se realizó un nuevo ensayo de caracterización al muro afectado a partir de desplazamientos sinusoidales de 2,0 mm, registrando su rigidez con daño y obteniendo el ciclo histerético mostrado en Figura 9. Las propiedades iniciales y finales del muro son registradas en la Tabla 3.

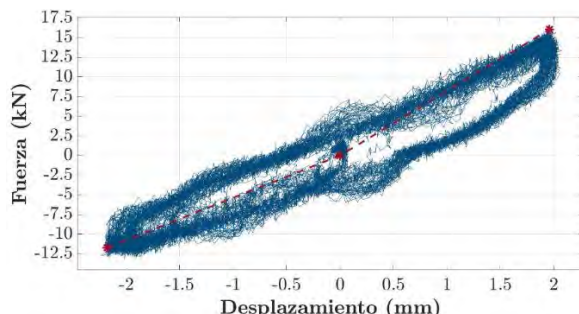


Figura 9. Histéresis MDCR afectado

Tabla 3. Propiedades iniciales y finales del MDCR

Dirección	Deriva Inicial (%)	Rigidez inicial (kN/m)	Rigidez última (kN/m)	Deriva última (%)
Positiva	0,21	56,98*1e3	8,17*1e3	1,4
Negativa	-0,22	48,55*1e3	6,57*1e3	-1,4

2.5 Sistema de Transferencia ST

En las SHTR, los ST tienen la tarea de transmitir físicamente, en la interfaz entre las subestructuras, la respuesta del componente numérico sobre el experimental y, mediante el sistema de adquisición, adquirir su respuesta para retroalimentar nuevamente a la subestructura numérica, esto en cada paso de tiempo Δt . La respuesta de la edificación de MDCR aislada se determinó mediante la técnica de SHTR, empleando como subestructura experimental un MDCR afectado cíclicamente y el resto la estructura aislada como componente numérico. Para ello, se utilizó como sistema de transferencia a cortante el Marco de Pruebas y Homologaciones MP-H de la Universidad del Valle, el cual es mostrado en la Figura 10b, para la ejercer la fuerza lateral sobre el muro; y el sistema de carga constante vertical, para la aplicación de la carga de compresión de 274.58 kN; además, como Sistema de Adquisición SA se dispone una celda de carga con capacidad para 10,0 kLb.

El Sistema de Transferencia Horizontal STH posee una capacidad hidráulica de 42,0 gpm a una presión constante de 3000 psi. El STH se encuentra compuesto por un cilindro hidráulico con recorrido de 30,0 cm, $\varnothing 3,5$ in de diámetro de vástago y $\varnothing 8,0$ in de diámetro interno; y una servoválvula MOOG D662-4770, lo que permitió el desarrollo de controlador robusto tipo H_{∞} de seguimiento por desplazamiento para la planta identificada en la ecuación (7) mediante la implementación del controlador definido en la ecuación (8), implementando además, un Filtro de Kalman con el fin de reducir el ruido registrado por el LVDT y contribuir con la estabilización de la SHTR, como se muestra en la Figura 10a. Este controlador fue diseñado bajo los lineamientos de implementación de la función *hinfstruc* de Matlab [41].

Como se expone en la Figura 10b, este sistema se encuentra adosado en la parte superior del MP-H para garantizar la relación momento-cortante de diseño del muro. El Sistema de Transferencia Vertical STV se opera a partir de la unidad de potencia portátil con capacidad de 1,5 gpm y una presión de trabajo de 3000 psi. El STV se compone de dos cilindros hidráulicos con un recorrido de 10.0 cm, $\varnothing 5,0$ in de diámetro de vástago y $\varnothing 10,0$ in de diámetro interno. Este sistema es controlado mediante variación de presión en la unidad de potencia portátil.

$$G_{planta} = \frac{1.727s+2.848}{s^2+1.572s-0.1272} \quad (7)$$

$$C_{Control} = \frac{-6.46*1e10*s^4 - 1.33*1e12*s^3 - 3.93*1e12*s^2 - 3.25*1e12*s - 1.70*1e11}{s^5 - 1.84*1e08*s^4 - 3.08*1e08*s^3 + 4.90*1e08*s^2 + 8.21*1e08*s + 3.86*1e06} \quad (9)$$

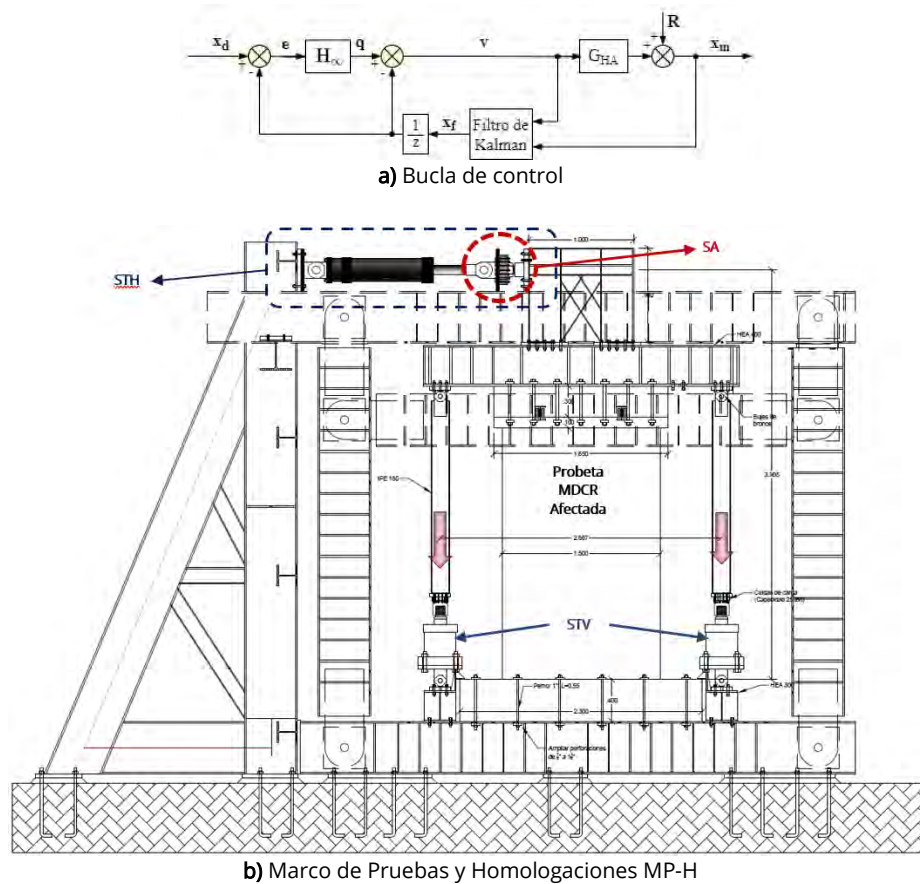


Figura 10. Montaje experimental

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para determinar el desempeño sísmico de la edificación de MDCR aislada, se realizaron dos SHTR bajo diferentes excitaciones sísmicas, correspondientes a los sismos de El Centro (USA 1940), Kobe (Japón 1995); con amplitudes máximas de 6.80 m/s^2 ($0,70 \text{ g}$) y 9.81 m/s^2 ($1,00 \text{ g}$), mostrados en la Figura 11.

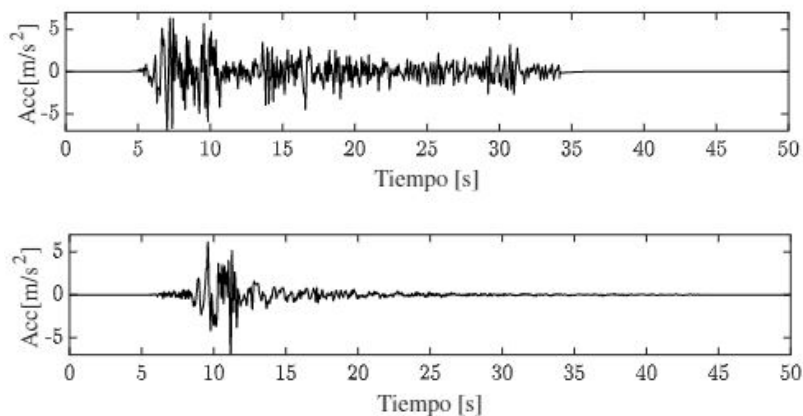


Figura 11. Excitaciones sísmicas: a) El Centro; b) Kobe

Para el desarrollo de la SHTR de la edificación de MDCR aislada con un porcentaje de muros afectados se interconectaron la subestructura numérica, la subestructura experimental y los sistemas de transferencia, como se encuentra esquematizado en la Figura 12. En la esquematización la SN es excitada dinámicamente por una entrada de sismo en la base \ddot{a}_g dando como resultado la respuesta en desplazamiento $U_{a,d}$, esta señal corresponde a la referencia del STH quien la reproduce en un desplazamiento $U_{a,m}$ sobre la SE conformada por el MDCR afectado.

Paralelamente, el STV ejerce una carga axial constante de 274,58 kN con el fin de simular las condiciones de interfaz de la probeta en la edificación. La respuesta de la SE se adquiere como una fuerza medida F_m por

una celda de carga horizontal de 10.000 Lb y procesada por la cantidad de MDCR afectados en el primer nivel de la estructura, correspondiente al 12,76% en esta investigación, obteniendo así la fuerza de retroalimentación F_{feed} de la SN y completar el lazo dinámico. Lo anterior se realiza en cada paso de tiempo Δt a una frecuencia de muestreo de 1024 Hz.

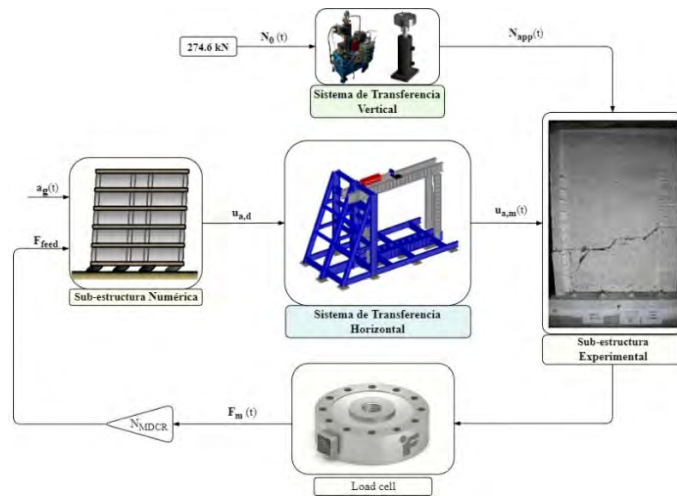


Figura 12. Esquema de SHTR para edificación aislada con MDCR afectados

La técnica de SHTR permitió determinar el comportamiento de la edificación aislada durante los dos eventos sísmicos planteado. Logrando desarrollar la histéresis del MDCR afectado para ambos sismos a dos magnitudes diferentes, 0,7 y 1,0 g, como se muestra en la Figura 13-14.

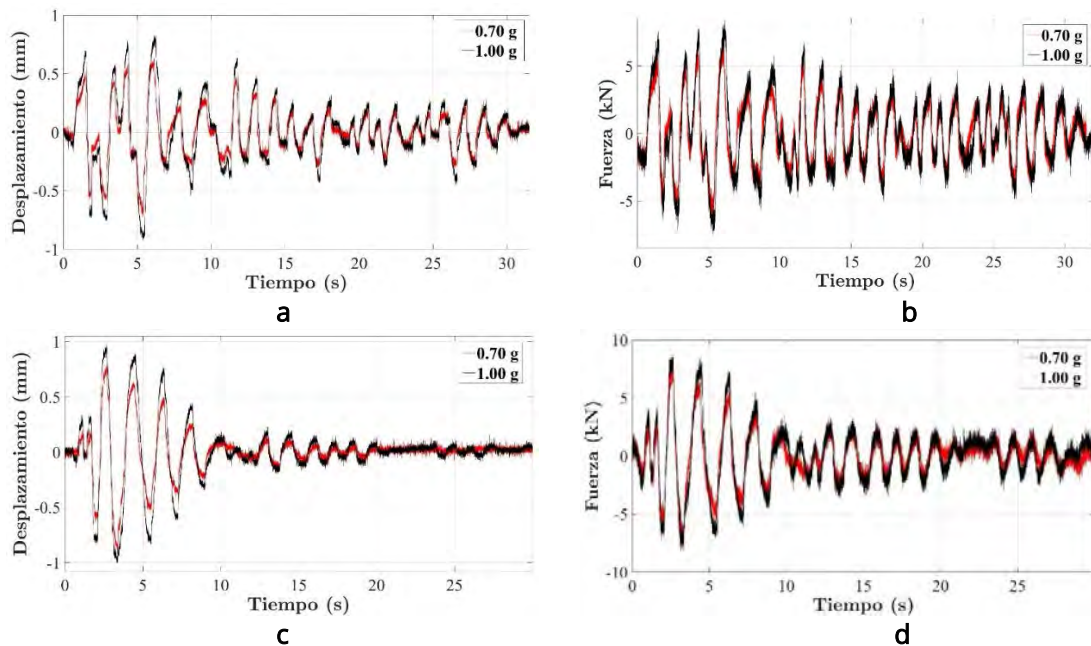


Figura 13. Respuestas en desplazamiento y fuerza vs Tiempo de la probeta de MDCR afectada: a) Desplazamiento vs Tiempo MDCR - afectado sismo El Centro; b) Fuerza vs Tiempo MDCR - afectado sismo El Centro; c) Desplazamiento vs Tiempo MDCR - afectado sismo Kobe; d) Fuerza vs Tiempo MDCR - afectado sismo Kobe

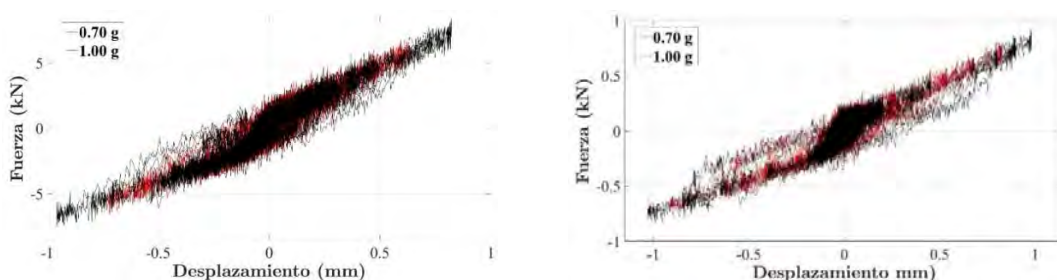


Figura 14. Histéresis de probeta de MDCR afectado: a) Sismo de El Centro; b) Sismo de Kobe

En la literatura se han propuesto algunos índices para determinar la precisión de las SHTR. El primer valor es el índice de evaluación de frecuencia (FEI) [42] el cual compara la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal deseada (Y_c) con la de la señal medida (Y_m) en el actuador. Adicionalmente, la evaluación del seguimiento del sistema de transferencia, determina la frecuencia de mayor participación durante la SHTR (f^{eq}), la cual es obtenida mediante la serie de ecuaciones (9) a (15). Otro parámetro importante es la amplitud generalizada A_0 , el cual permite calcular la correspondencia de amplitud entre la señal de referencia y la medida, y se define como el valor absoluto de FEI. Finalmente, el retraso en tiempo o delay (δ) se estima como el valor opuesto del argumento FEI sobre la frecuencia angular equivalente.

$$e_{DM} = \frac{|\max(|U_{a,d}(t)|) - \max(|U_{a,m}(t)|)|}{\max(|U_{a,d}(t)|)} \quad (9)$$

$$e_{MD} = \frac{\max(|U_{a,d}(t) - U_{a,m}(t)|)}{\max(|U_{a,d}(t)|)} \quad (10)$$

$$FEI = \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{y_m(j)}{y_c(j)} \cdot \frac{\|y_c(j)\|^l}{\sum_{i=1}^N \|y_c(i)\|^l} \right\} \quad (11)$$

$$f^{eq} = \frac{\sum_{j=1}^N \{\|y_c(j)\|^l \cdot f_j\}}{\sum_{j=1}^N \|y_c(j)\|^l} \quad (12)$$

$$A_0 = \|FEI\| \quad (13)$$

$$\phi = \arctan[Im(FEI)/Re(FEI)] \quad (14)$$

$$\delta = -\frac{\phi}{2\pi f^{eq}} \quad (15)$$

Los índices de la evaluación fueron obtenidos para los dos sismos en magnitudes de 0,7 y 1,0 g , como se presenta en la Tabla 4. Para todos los casos se observa alto nivel de seguimiento de la respuesta, con valores de amplitud generalizada A_0 cercanos a 1,0, errores menores al 1,8% y *delay* en el tiempo menores a 8,0 ms , lo que permite concluir que el Marco de Pruebas y Homologaciones MPa-H como sistema de transferencia horizontal tiene alto rendimiento y permite realizar las SHTR con nivel destacados de precisión.

Tabla 4. Índices de evaluación de las SHTR

Sismo	FEI	F_{eq} (Hz)	A_0	e_{DM} (%)	e_{MD} (%)	δ (ms)
El Centro 0,7 g	1,006-0.00i	249,704	1,006	0,379	1,710	< 7,00
El Centro 1,0 g	1,006-0.00i	249,738	1,006	0,151	1,530	< 5,00
Kobe 0,7 g	1,005-0.00i	249,447	1,005	0,252	1,153	< 8,00
Kobe 1,0 g	1,004-0.00i	249,620	1,004	0,213	1,161	< 6,00

Por otro lado, el modelo de Bouc-Wen aumentado utilizado para representar numéricamente el comportamiento histerético y considerablemente no-lineal del sistema de aislamiento de la estructura de MDCR presentó un comportamiento esperado alcanzando altos niveles de deformación frente al sismo e induciendo una capacidad de disipación de energía a la estructura y así proteger el vulnerable sistema de MDCR del SI ante eventos sísmicos. En la Figura 15-16 se presenta el comportamiento desarrollado por el sistema de aislamiento propuesto, para uno de los doce aisladores.

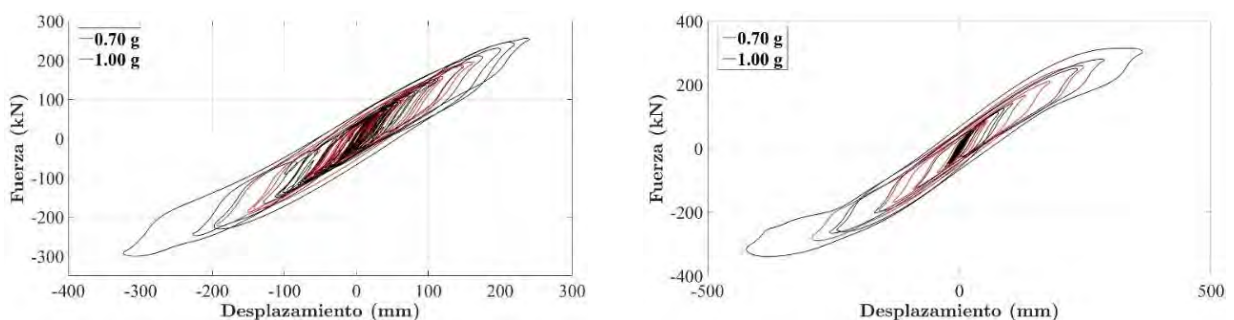


Figura 15. Histéresis de modelo Bouc-Wen aumentado del sistema de aislamiento en la base: a) Sismo de El Centro; b) Sismo de Kobe

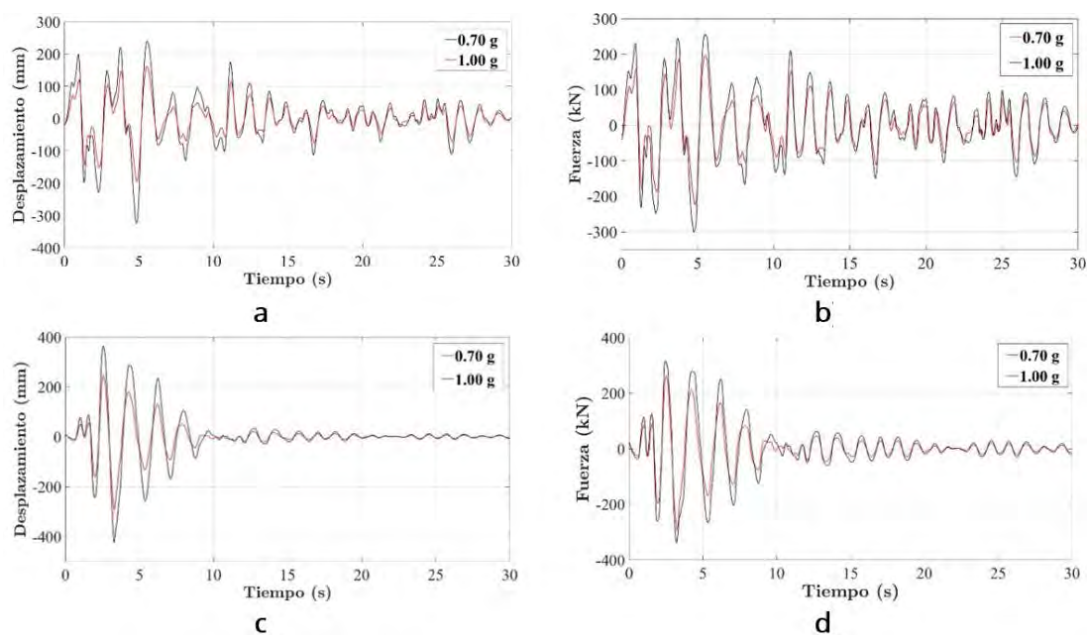


Figura 6. Respuestas en desplazamiento y fuerza vs Tiempo del modelo Bouc-Wen extendido del sistema de aislamiento en la base: a) Desplazamiento vs Tiempo BW Aislamiento - sismo El Centro; b) Fuerza vs Tiempo BW Aislamiento - sismo El Centro; c) Desplazamiento vs Tiempo BW Aislamiento - sismo Kobe; d) Fuerza vs Tiempo BW Aislamiento - sismo Kobe

4. CONCLUSIONES

Se planteó y desarrolló una sub estructuración dinámica de una edificación aislada con MDCR en tres subcomponentes principales.

El primer subcomponente lo constituyó el sistema de aislamiento en la base, el cual se diseñó como doce aisladores elastómericos no conectados representados por un modelo numérico ajustado de Bouc-Wen aumentado con las constantes expuestas en la Tabla 2; el segundo subcomponente corresponde a la probeta experimental de MDCR afectado con anterioridad en un test cíclico y con las propiedades presentadas en la Tabla 3.

El último subcomponente fue el restante de la edificación aislada de MDCR representada por un pórtico a cortante de 6-GDL. La sub estructuración se realizó según la descomposición dinámica, permitiendo una retroalimentación constante en cada paso de tiempo (1024 Hz) de las tres subestructuras.

Implementado como sistema de transferencia en la SHTR demostró un desempeño fiable y preciso en la reproducción de la interfaz entre la subestructura numérica y experimental, alcanzando en la evaluación de las SHTR valores de amplitud generalizada (A_0) cercanos a 1.0, errores menores al 1.8% y delay en el tiempo menores a 8.0 ms.

Se realizaron pruebas de SHTR de la edificación de MDCR aislada bajo dos eventos sísmicos: El Centro y Kobe, con aceleraciones de 6.80 m/s^2 (0,70 g) y 9.81 m/s^2 (1,00 g) para ambos casos. En las cuales se obtuvo las curvas de histéresis del sistema de aislamiento en el base representado por el modelo Bouc-Wen aumentado, evidenciando un desempeño viscoelástico típico de esta tecnología contribuyendo con el aumento de la capacidad de disipación de la estructura y disminuyendo la vulnerabilidad del SI de MDCR. La probeta de MDCR afectado presentó en su comportamiento histerético con una esperada baja capacidad de disipación de energía.

Sin embargo, se demostró que al considerar el 12,76% de los muros de la base como afectados, en la dirección de análisis, el sistema de aislamiento tiene la capacidad de disminuir la vulnerabilidad de la edificación manteniendo el SI en un estado de deformación casi lineal. Lo anterior permite contemplar al aislamiento en la base como una técnica de control estructural con la capacidad de proteger la integridad estructural ante posibles replicas sísmicas para su posterior intervención y recuperación.

Agradecimientos

Esta investigación hace parte del proyecto de Investigación *Simulaciones híbridas en tiempo real: una alternativa confiable, rápida y económica para la evaluación de estructuras resilientes*, en el marco del programa *Tecnologías emergentes para la mitigación de riesgo sísmico de infraestructura civil*, CT 80740-463-2020. Los autores desean expresar sus agradecimientos a la Universidad del Valle y al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (Minciencias), entidad que financia el programa.

REFERENCIAS

- [1] Dyke S. et al. (2010). Vision 2020: An open space technology workshop on the future of earthquake engineering: A report on the NSF-Funded Workshop. Held January 25-26.
- [2] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2017). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- [3] Ortega R. et al. (2021). Evaluation and fitting of a numerical model for reinforced concrete thin walls through experimental results of monotonic and cyclic loading tests. *Latin American Journal of Solids and Structures* 18.
- [4] Construdata. (2013). Los materiales de construcción. Recuperado: http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp
- [5] Sánchez J. y Arteta C. (2017). Caracterización estadística de edificios de muros delgados en concreto reforzado para zonas de amenaza sísmica alta. En VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.
- [6] Gil D. y Cano L. (2018). Reporte Burkenroad: Cementos Argos S.A. Disertación Doctoral. Universidad EAFIT.
- [7] Caraballo R. et al. (2021). Desempeño sísmico de muros delgados y esbeltos de concreto reforzado representativos de la construcción industrializada. *Hormigón y Acero*.
- [8] Camacol. (2019). Colombia construcción en cifras. Recuperado: <https://camacol.co/informacion-economica/construccion-en-cifras>.
- [9] Abdullah S. y Wallace J. (2018). Drift capacity prediction of RC structural walls with special boundary elements. En 11th National Conference in Earthquake Engineering.
- [10] Almeida J. et al. (2017). Tests on thin reinforced concrete walls subjected to in-plane and out-of-plane cyclic loading. *Earthquake Spectra* 33(1), 323-345.
- [11] Alarcon C. et al. (2014). Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries. *Engineering Structures* 73, 13-23.
- [12] Wallace J. et al. (2012). Damage and implications for seismic design of RC structural wall buildings. *Earthquake Spectra* 28(1), 281-299.
- [13] Almeida J. et al. (2016). Tests on thin reinforced concrete walls subjected to in-plane and out-of-plane cyclic loading. *Earthquake Spectra* 33(1), 323-345.
- [14] Parra P. y Moehle J. (2017). Stability of slender wall boundaries subjected to earthquake loading. *ACI Structural Journal* 114(6), 1627-1636.
- [15] Carrillo J. et al. (2019). Tensile mechanical properties of the electro-welded wire meshes available in Bogotá, Colombia. *Construction and Building Materials* 195, 352-362.
- [16] Dey R. y Saha P. (2019). Seismic response control of smart base-isolated benchmark building using hybrid control strategy (viscous fluid damper with MR damper). *Recent Advances in Structural Engineering* 2, 365-374.
- [17] Nakata N. et al. (2014). Hybrid simulation primer and dictionary. Apress.
- [18] Najafi A. y Spencer B. (2021). Validation of model-based real-time hybrid simulation for a lightly-damped and highly-nonlinear structural system. *Journal of Applied and Computational Mechanics* 7, 1252-1265.
- [19] Takanashi K. y Nakashima M. (1987). Japanese activities on on-line testing. *Journal of Engineering Mechanics* 113(7), 1014-1032.
- [20] Darby A. et al. (1999). Real-time substructure tests using hydraulic actuator. *Journal of Engineering Mechanics* 125(10), 1133-1139.
- [21] Nakashima M. et al. (1992). Development of real-time pseudo dynamic testing. *Earthquake engineering & structural dynamics* 21(1), 79-92.
- [22] Maghareh A. et al. (2020). A Reflective Framework for Performance Management (REFORM) of Real-Time Hybrid Simulation. *Frontiers in built environment* 6, 568742.
- [23] Fernandois G. y Spencer B. (2017). Model-based framework for multi-axial real-time hybrid simulation testing. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 16(4), 671-691.
- [24] Ning X. et al. (2019). Robust actuator dynamics compensation method for real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing* 131, 49-70.
- [25] Shao X. y Griffith C. (2013). An overview of hybrid simulation implementations in NEES projects. *Engineering Structures* 56, 1439-1451.
- [26] Eem S. et al. (2013). Seismic performance evaluation of an MR elastomer-based smart base isolation system using real-time hybrid simulation. *Smart Materials and Structures* 22(5), 055003.

- [27] Nakashima M. et al. (1992). Development of real-time pseudo dynamic testing. *Earthquake engineering & structural dynamics* 21(1), 79-92.
- [28] Takanashi K. et al. (1975). Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator on-line system. *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center* 8, 1-17.
- [29] Mahin S. et al. (1989). Pseudodynamic test method—Current status and future directions. *Journal of Structural Engineering* 115(8), 2113-2128.
- [30] Silva C. et al. (2020). Benchmark control problem for real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing* 135, 106381.
- [31] Strano S. y Terzo M. (2016). Implementation and validation of a hybrid testing procedure for base-isolated structures. En *World Congress on Engineering*.
- [32] Shao X. et al. (2011). Real-time hybrid simulation using shake tables and dynamic actuators. *Journal of Structural Engineering* 137(7), 748-760.
- [33] Tidwell T. et al. (2009, March). Towards configurable real-time hybrid structural testing: a cyber-physical system approach. En *IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing*.
- [34] Christenson R. et al. (2008). Large-scale experimental verification of semiactive control through real-time hybrid simulation. *Journal of Structural Engineering* 134(4), 522-534.
- [35] Gomez D. et al. (2015). Enabling role of hybrid simulation across NEES in advancing earthquake engineering. *Smart Structures and Systems* 15(3), 913-929.
- [36] Riascos C. et al. (2022). Real-time hybrid simulations including rocking effects: The case of a frame-structure with unbounded elastomeric isolators. *Structural Control and Health Monitoring* e2984.
- [37] Safety I. (2003). Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. FEMA 450.
- [38] Losanno D. et al. (2019). Experimental assessment and analytical modeling of novel fiber-reinforced isolators in unbounded configuration. *Composite Structures* 212, 66-82.
- [39] Sísmica E. D. M. (2017). Informe 1-7 Elementos Sismológicos para la Caracterización de la Actividad Cortical en el Occidente Colombiano. *Sísmica*.
- [40] CSI C. (2015). Analysis reference manual for sap2000, etabs, safe and csibridge. *Computers and Structures*.
- [41] Riascos C. et al. (2019). Performance evaluation of a non-linear tuned mass damper through real-time hybrid simulation. *Inge CUC* 15(2), 11-22.
- [42] Christenson R. et al. (2014). Hybrid simulation: A discussion of current assessment measures. *Tech. Rep. Cmmi*.

Análisis numérico de los gradientes térmicos por cargas de temperatura en tableros de puentes de concreto reforzado

Camilo Andrés Ballesteros Avellaneda¹

Edison Osorio Bustamante²

Erika Lorena Becerra Becerra³

Universidad Antonio Nariño

Colombia

Los cambios térmicos medioambientales producen deformaciones y esfuerzos en las estructuras, que pueden acelerar la fisuración en el concreto y acortar su durabilidad. Actualmente, Colombia carece de estudios específicos sobre las cargas térmicas en los puentes, en consecuencia, se desarrolla un modelo numérico programando en Python. Se trata de un algoritmo que soluciona el problema unidimensional en estado transitorio para simular mecanismo de transferencia de calor en el tablero de un puente de concreto. Los resultados se validan con problemas de referencia académica, además, se realiza una comparación con datos de temperatura superficial con mediciones con cámara térmica para dos puentes localizados en Bogotá y Neiva, Colombia. El modelo numérico arroja resultados similares a los problemas de referencias y representa el comportamiento de la variación de la temperatura superficial para los puentes estudiados.

¹ Estudiante de Ingeniería civil.

Contacto: cballesteros23@uan.edu.co

² Ingeniero Civil.

Contacto: e.osorio@uan.edu.co

³ Ingeniera Civil.

Contacto: ebecerra84@uan.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Con el avance de la tecnología y acceso a ella, en el territorio colombiano se ha dado paso a la construcción de obras de ingeniería que permiten atravesar la cadena montañosa que compone nuestro país. Además, la creciente población y su correspondiente aumento en el tráfico de vehículos en las ciudades, se demanda la construcción de infraestructura, en donde los puentes son un componente clave en este desarrollo. Su costo se amortiza con los costos logísticos para la sociedad.

Si bien en Colombia se cuentan con un código para el diseño para puentes y estructuras, las cargas de temperatura es un tema pendiente por falta de estudios locales [1]. Los valores y métodos de diseño que se han venido utilizando en Colombia para el diseño de puentes fueron adoptados de las especificaciones de diseño LRFD de la American Association of State Highway and Transportation Officials [2].

La incertidumbre de valores utilizados para el diseño y la construcción de estas estructuras se ve incrementada por las diferencias geográficas y climáticas, entre los países en los cuales se desarrollan los estudios y en los cuales se aplica, a esto se suma a los cambios en el ambiente debido al cambio climático. En consecuencia, en el presente trabajo se desarrolla un modelo de análisis numérico para la distribución térmica en la losa del tablero de los puentes debido a las cargas térmicas, se valida con problemas de referencia de la literatura y se analizan dos condiciones para Colombia para las cuales se cuenta con mediciones con cámaras termográficas.

La distribución térmica en los puentes es problema de transferencia de calor, en este trabajo se focaliza sobre el gradiente térmico en la losa de un puente en concreto teniendo en cuenta la carpeta asfáltica. Es reconocible la complejidad del fenómeno por lo cual se realizan una serie de simplificaciones. En este caso, se realiza en cuanto a la geometría del elemento a analizar, a saber, que la distribución de la temperatura se produce principalmente a través de la placa en sentido vertical, siendo generalmente despreciable en las otras dos dimensiones, resultando en el modelado del fenómeno a uno de tipo unidimensional [3, 4]. En la Figura 1 se presentan los mecanismos de transferencia de calor del problema. En este trabajo, la solución del problema diferencial se aborda mediante el método numérico de las diferencias finitas [5].

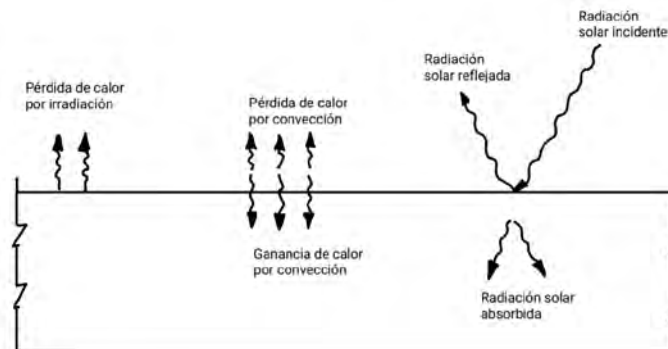


Figura 1. Representación de los mecanismos de transferencia de calor del problema [4]

2. MÉTODO

El desarrollo del modelo se hace en base al control de la energía en elemento volumen durante el intervalo de tiempo según lo propone [5]. Se plantea como: la suma del calor transferido al elemento junto con el calor generado por el mismo durante el intervalo de tiempo ha de ser igual al cambio de la energía dentro del elemento volumen, tal como se plantea en la ecuación (1).

$$\sum \dot{Q}^i + \dot{E}_{generado}^i = \rho V_{elemento} c_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (1)$$

Conociendo que el proceso se lleva a cabo en un sistema transitorio el flujo de calor estará en función del momento en el cual se evalúe, por cual se hace necesario introducir superíndices que indiquen la situación, al desarrollarse en función del método explícito se obtiene la expresión general, descrita en la ecuación (1),

para el desarrollo de las ecuaciones que se usarán durante la programación, la cual es coincidente con la propuesta por [4]. Una vez establecido el modelo a utilizar se plantean también las ecuaciones que describen los fenómenos térmicos de: conducción, convección, radiación e irradiación, descritas en las ecuaciones (2) a (5), respectivamente.

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

Donde:

\dot{Q}_{cond} : Razón de transferencia de calor por conducción.

k: Constante de conductividad térmica propia del material.

A: Superficie de transferencia.

$T_1 - T_2$ o ΔT : Diferencia de temperatura entre los dos puntos en los que ocurre el fenómeno.

Δx : Distancia entre los dos puntos en los que ocurre el fenómeno.

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Donde:

\dot{Q}_{conv} : Razón de transferencia de calor por convección.

h: Constante de convección propia de la interacción en la superficie del material.

T_s : Temperatura superficial del elemento.

T_∞ : Temperatura del medio ambiente.

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (4)$$

Donde:

$\dot{Q}_{absorbida}$: Razón de transferencia de calor absorbido por radiación.

$\dot{Q}_{incidente}$: Razón de transferencia de calor neta por radiación.

α : Constante de absorción del material.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (5)$$

Donde:

\dot{Q}_{rad} : Razón de emisividad de calor.

ε : Constante emisividad del material.

σ : Constante empírica de Stefan-Boltzmann

T_s : Temperatura superficial del elemento.

T_∞ : Temperatura del medio ambiente.

Para el desarrollo propuesto se parte de que no hay una generación de calor por el elemento, con lo cual tan solo se tendrán en cuenta los procesos de transferencia de calor descritos. Las ecuaciones (2) a (5) se rempazan en la ecuación (1), según corresponda para cada caso. El punto superior del elemento estará sujeto a los cuatro mecanismos, de manera que la ecuación (6) describe el fenómeno para este punto.

$$T_0^{i+1} = \frac{2h(T_\infty^i - T_0^i)\tau\Delta x}{k} + \frac{2kq^i\tau\Delta x}{k} + 2\tau(T_1^i - T_0^i) + \frac{2\varepsilon\sigma(T_0^{i4} - T_\infty^{i4})\tau\Delta x}{k} + T_0^i \quad (6)$$

Los nodos intermedios tan solo estarán sujetos al mecanismo de conducción, despejando se llega a la ecuación (7) descrita por [4].

$$T_n^{i+1} = \tau(T_{n-1}^i + T_{n+1}^i) + (1 - 2\tau)T_n^i \quad (7)$$

El punto inferior del elemento no estará expuesto a radiación, por lo que la ecuación (6) se reducirá a la (8).

$$T_n^{i+1} = \frac{2h(T_\infty^i - T_n^i)\tau\Delta x}{k} + 2\tau(T_{n-1}^i - T_n^i) + \frac{2\varepsilon\sigma(T_n^{i4} - T_\infty^{i4})\tau\Delta x}{k} + T_n^i \quad (8)$$

Con los fenómenos definidos, las variables y las ecuaciones formuladas se desarrolla el algoritmo para resolver las ecuaciones que describen el fenómeno, en la Figura 2 se resume el diagrama de flujo. Este algoritmo se programa en lenguaje de Python, para el desarrollo se utilizaron las librerías de math, numPy y pandas, las dos primeras brindan herramientas para realizar funciones matemáticas y almacenar o analizar gran volumen de datos, por su parte la librería Pandas permite exportar los datos obtenidos hacia otro documento en formato xlsx o csv [6-8].

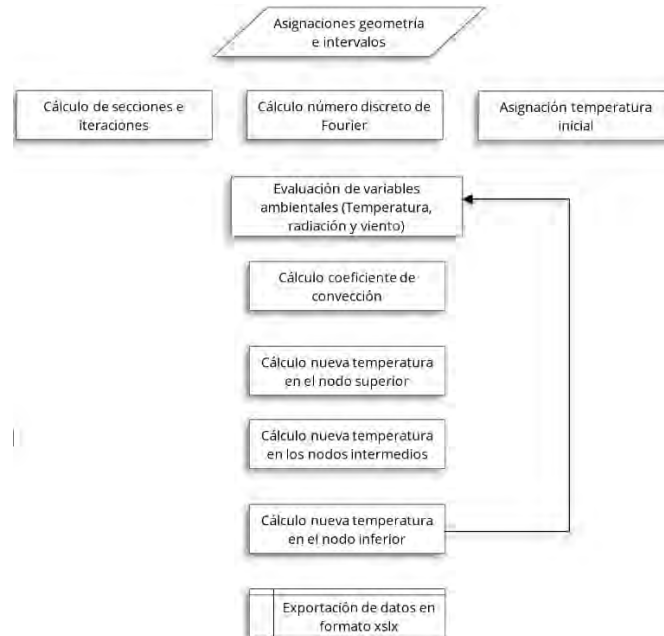


Figura 1. Diagrama de flujo algoritmo

3.2 Validación del modelo

La verificación del modelo se realiza contrastando los resultados del algoritmo propuesto con tres problemas de referencia de la literatura:

1. *Problema 5-86* [8]. El planteamiento del problema consiste en un plato de uranio inicialmente con temperatura uniforme es aislado en un extremo y sometido a convección en el otro. Se debe obtener la formulación por medio de diferencias finitas y la temperatura en los nodos luego de 5 minutos.
2. *Problema 5-88* [8]. En este problema, se estudia la transferencia de calor pasiva a una casa por la radiación solar, se debe determinar la distribución de la temperatura en la pared en un intervalo de 12h durante el primer y el segundo día. La temperatura inicial del muro se distribuye linealmente con 20 °C al interior del muro y 0 °C al exterior. La temperatura del ambiente y la radiación solar está dada por la Tabla 1.

Tabla 1. Temperatura y radiación solar durante un día [4]

Hora	Temperatura (°C)	Radiación solar (W/m ²)
7 am - 10 am	0	375
10 am - 1 pm	4	750
1 pm - 4 pm	6	580
4 pm - 7 pm	1	95
7 pm - 10 pm	-2	0
10 pm - 1 am	-3	0
1 am - 4 am	-4	0
4 am - 7 am	-4	0

3. *Ejemplo 5.12* [5]. Esta validación de referencia plantea el problema sobre una delgada placa de cobre a una temperatura uniforme de 20 °C se expone repentinamente a una radiación constante de 3×10^5 W/m². Determine la temperatura de un punto que está ubicado a 150 mm de la superficie.

3.3 Aplicación técnica

Para la aplicación técnica del algoritmo se eligieron dos puentes, cada uno ubicado en una ciudad con distintas condiciones climáticas a los cuales se les ha realizado un monitoreo con cámara térmica de la temperatura superficial. A partir de los datos ambientales existentes de mediciones diarias de temperatura máxima, mínima, velocidad promedio del viento diaria, y radiación solar se realiza un análisis por medio del modelo desarrollado para comparar los resultados con los valores medidos in situ de la estructura.

- *Puente de acceso a la Terminal Uno del Aeropuerto Internacional el Dorado-Bogotá.* Como resultado de la investigación realizada por [10], se cuenta con los datos de la temperatura de la placa para el puente de acceso a la Terminal Uno del Aeropuerto Internacional el Dorado en la ciudad de Bogotá en el intervalo del 4 de septiembre de 2018 y el 13 de octubre de 2018 de manera intermitente. Los datos se distribuyen en dos franjas horarias, una en las horas de la mañana comprendidas entre las 5:30 y las 6:30, y otra en horas de la tarde entre las 12:30 y las 14:30. En la Figura 2 se presenta un ejemplo del valor máximo registrado en el periodo sobre horas del mediodía.

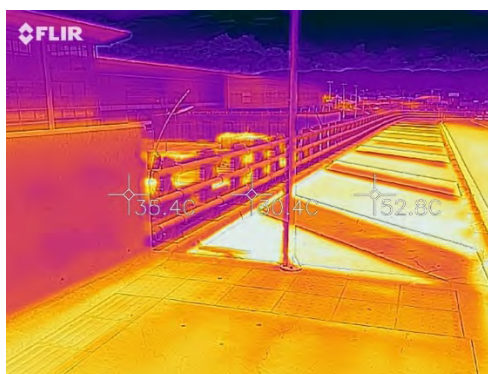


Figura 2. Ejemplo de datos de mediciones en el acceso a T1 del Aeropuerto el Dorado - Bogotá [10]

- *Puente Tizón, Neiva.* De acuerdo con el trabajo realizado [11], el puente Tizón en la ciudad de Neiva se tienen los datos de la temperatura del tablero para en el intervalo del 12 de diciembre de 2019 y el 6 de enero de 2020. Los datos se distribuyen en dos franjas horarias, una en las horas de la mañana comprendidas entre las 6:15 y las 7:15, y otra en horas de la tarde entre las 12:00 y las 14:20. En la Figura 3 se muestra la medición del valor máximo de temperatura superficial medido en el periodo de estudio.



Figura 3. Ejemplo de datos de mediciones en el puente Tizón, Neiva [11]

4. Resultados

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para el problema 5-86 [8] para los nodos 1,3 y 5 (ver columna Resultado) durante los 135 s iniciales y finales. Además, se comparan con los presentados en la referencia [8] mediante el cálculo del error absoluto, obteniéndose valores menores al 0,0%. De forma similar, en la Tabla 3 se muestran los resultados para el problema 5-88 [8] para los nodos 0, 2, 4 y 6 (ver columna Resultado) para las horas de referencia del problema.

Adicionalmente, se comparan con los presentados en la referencia [8] con errores menores al 0,5%. Por último, en la Tabla 3 se presenta los resultados del problema 5,12 [9] y usando los mismos tiempos

planteados de la referencia, se obtienen errores absolutos menores 0,4%. Con lo anterior, se concluye que el modelo tiene capacidad de reproducir de forma adecuada los fenómenos de transferencia de calor de interés para el objeto de estudio.

Tabla 2. Resultados ejemplo de verificación para el problema 5-86

Tiempo	T ₁			T ₃			T ₄		
	Ref. [4]	Resultado	Error	Ref. [4]	Resultado	Error	Ref. [4]	Resultado	Error
0	100	100,00	0,0%	100	100,00	0,0%	100	100,00	0,0%
15	106,7	106,70	0,0%	106,7	106,70	0,0%	104,8	104,82	0,0%
30	113,4	113,39	0,0%	113,4	113,39	0,0%	111,3	111,29	0,0%
45	120,1	120,09	0,0%	119,7	119,68	0,0%	117	116,99	0,0%
60	126,8	126,79	0,0%	126,3	126,27	0,0%	123,3	123,34	0,0%
75	133,3	133,30	0,0%	132,6	132,56	0,0%	129,2	129,24	0,0%
90	139,9	139,93	0,0%	139,1	139,08	0,0%	135,5	135,51	0,0%
105	146,4	146,36	0,0%	145,4	145,36	0,0%	141,5	141,49	0,0%
120	152,9	152,92	0,0%	151,8	151,83	0,0%	147,7	147,71	0,0%
135	159,3	159,30	0,0%	158,1	158,10	0,0%	153,7	153,71	0,0%
...
...
3465	1217	1216,58	0,0%	1203	1202,55	0,0%	1160	1160,10	0,0%
3480	1220	1220,00	0,0%	1206	1205,92	0,0%	1163	1163,35	0,0%
3495	1223	1223,40	0,0%	1209	1209,29	0,0%	1167	1166,59	0,0%
3510	1227	1226,79	0,0%	1213	1212,64	0,0%	1170	1169,82	0,0%
3525	1230	1230,18	0,0%	1216	1215,98	0,0%	1173	1173,04	0,0%
3540	1234	1233,55	0,0%	1219	1219,31	0,0%	1176	1176,26	0,0%
3555	1237	1236,92	0,0%	1223	1222,64	0,0%	1179	1179,46	0,0%
3570	1240	1240,27	0,0%	1226	1225,95	0,0%	1183	1182,65	0,0%
3585	1244	1243,62	0,0%	1229	1229,26	0,0%	1186	1185,84	0,0%
3600	1247	1246,95	0,0%	1233	1232,55	0,0%	1189	1189,01	0,0%

La columna Ref. [8] son los obtenidos de [8]

Tabla 2. Resultados ejemplo de verificación problema 5-88

Hora	Iteración	Temperatura en los nodos °C											
		T ₀			T ₂			T ₄			T ₆		
		Ref. [4]	Resultado	Error	Ref. [4]	Resultado	Error	Ref. [4]	Resultado	Error	Ref. [4]	Resultado	Error
0h (7am)	0	20	20,00	0,00%	13,3	13,33	0,23%	6,66	6,66	0,00%	0	0,00	
6h (1pm)	24	17,5	17,46	0,22%	15,9	15,85	0,34%	24,8	24,83	0,14%	61,5	61,47	0,05%
12h (7pm)	48	21,4	21,42	0,08%	25,8	25,83	0,10%	34,6	34,64	0,11%	35,8	35,83	0,09%
18h (1am)	72	22,9	22,85	0,23%	26	26,01	0,02%	26	25,97	0,12%	19,1	19,05	0,27%
24h (7am)	96	21,6	21,62	0,10%	22,7	22,73	0,13%	20,4	20,49	0,43%	13,9	13,86	0,32%
30h (1pm)	120	21	20,97	0,17%	23,4	23,35	0,21%	34,1	34,12	0,05%	68,9	68,93	0,04%
36h (7pm)	144	24,1	24,05	0,19%	31,3	31,30	0,01%	41,1	41,06	0,09%	40,9	40,87	0,08%
42h (1am)	168	24,7	24,73	0,12%	29,9	29,89	0,03%	30,5	30,48	0,07%	22,6	22,56	0,16%
48h (7am)	192	23	22,95	0,21%	25,5	25,47	0,11%	23,7	23,66	0,16%	16,3	16,33	0,16%

La columna Ref. [8] son los obtenidos de [8]

Tabla 3. Resultados ejemplo de verificación problema 5-88

Paso	Tiempo	T ₀			T ₂			T ₄		
		Ref. [5]	Resultado	Error	Ref. [5]	Resultado	Error	Ref. [5]	Resultado	Error
0	0	20,0	20,0		20,0	20,0		20,0	20,0	
1	24	76,1	76,02	0,11%	20,0	20,0	0,00%	20,0	20,0	0,00%
2	48	76,1	76,11	0,01%	20,0	20,0	0,00%	20,0	20,0	0,00%
3	72	104,2	104,03	0,16%	34,0	33,96	0,12%	20,0	20,0	0,00%
4	96	104,2	104,16	0,03%	34,0	34,03	0,08%	20,0	20,0	0,00%
5	120	125,2	125,04	0,13%	48,1	47,94	0,33%	23,5	23,48	0,09%

La columna Ref. [5] son los obtenidos de [5]

Respecto a la aplicación técnica, para el análisis del tablero del Puente de acceso a la terminal uno del Aeropuerto Internacional el Dorado se obtuvieron los datos de la Figura 4. Adicionalmente, en las Figuras 5 y 6 se comparan los datos para los medidos en la parte inferior del tablero en horas del amanecer.

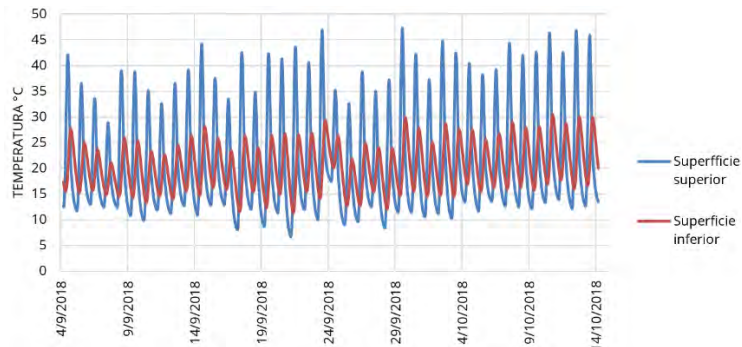


Figura 4. Resultados para la modelación tablero acceso a T1 del Aeropuerto el Dorado

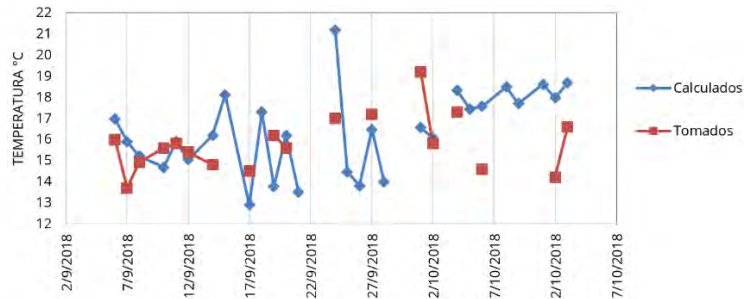


Figura 5. Comparación de temperatura inferior del Tablero acceso a la T1 al amanecer

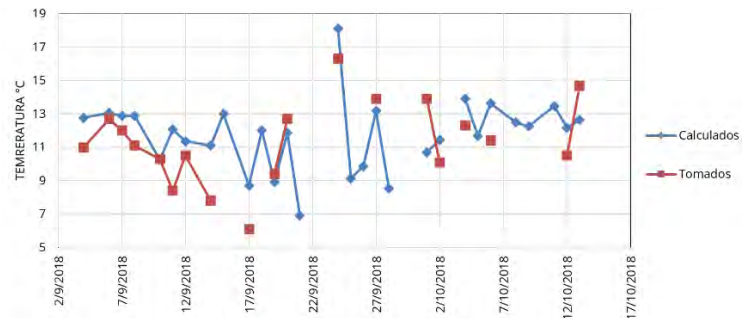


Figura 6. Comparación de temperatura superior del Tablero acceso a la T1 al amanecer

En las Figuras 7 y 8 se comparan los resultados en la parte superior del tablero para horas del mediodía. Nótese que, aunque se presentan desviaciones respecto a las mediciones en algunos puntos, el modelo arroja resultados en orden de magnitud y tendencia.

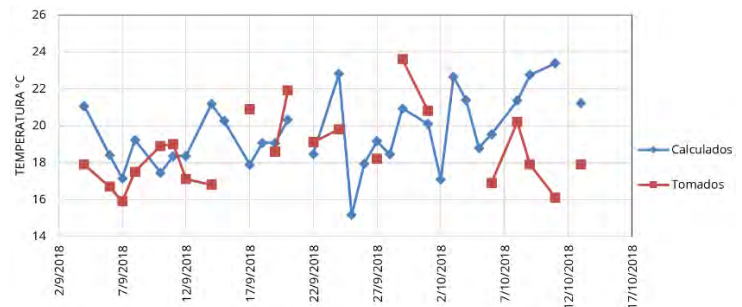


Figura 7. Comparación de temperatura inferior del Tablero acceso a la T1 al mediodía

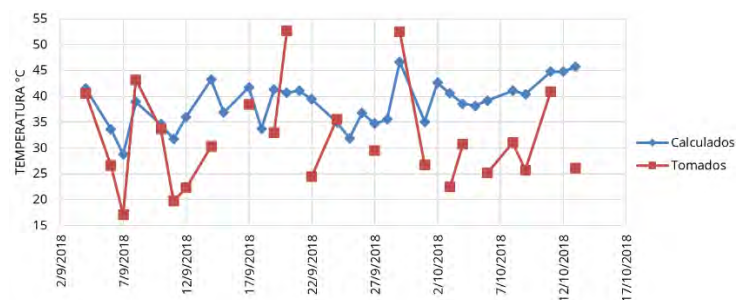


Figura 8. Comparación de temperatura superior del Tablero acceso a la T1 al mediodía

Con respecto al puente Tizón en Neiva, en la Figura 9 se presenta los resultados de la modelación en el periodo de interés.

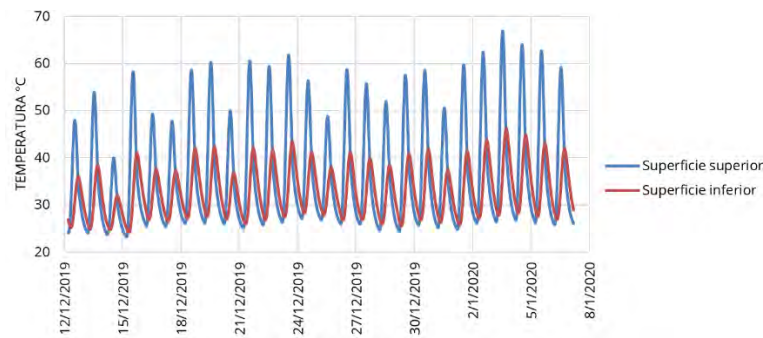


Figura 9. Resultados para la modelación tablero Puente Tizón en Neiva

En las Figuras 10 y 11 se presentan la comparación de los resultados con la temperatura medida en el tablero en la parte inferior y superior, respectivamente.

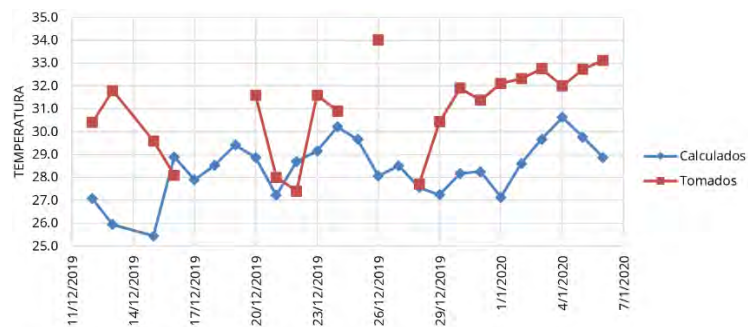


Figura 10. Comparación de temperatura inferior del Tablero puente Tizón al amanecer



Figura 11. Comparación de temperatura superior del Tablero puente Tizón al amanecer

En las Figuras 12 y 13 se comparan los resultados con los datos medidos sobre el mediodía tanto para la parte inferior como superior del tablero. De forma similar a los resultados anteriores, se observa que los resultados del modelo están en tendencia y orden de magnitud. En ambos puentes, las diferencias pueden deberse a la complejidad del mismo fenómeno, a su dinámica, simplificaciones de la formulación usada, a la temporalidad de los datos ambientales usados, entre otros factores.

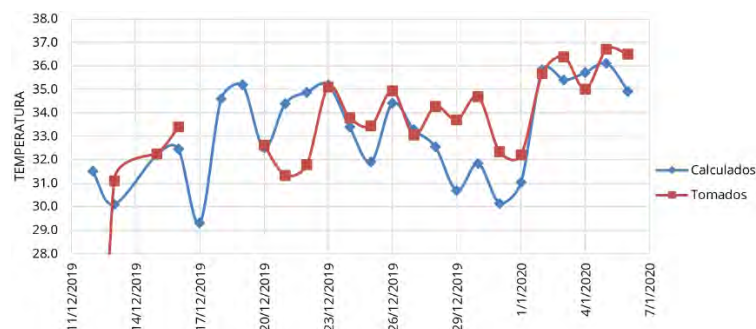


Figura 12. Comparación de temperatura inferior del Tablero puente Tizón al mediodía

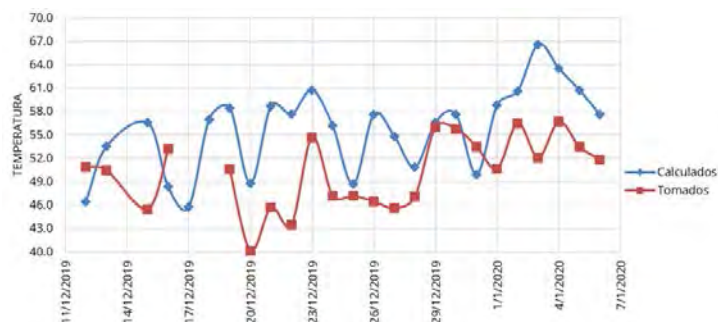


Figura 13. Comparación de temperatura superior del Tablero puente Tizón al amanecer

5. CONCLUSIONES

El algoritmo desarrollado tiene la capacidad de modelar la distribución térmica en una dimensión a través de la losa de un puente, para lo cual tiene en cuenta las propiedades térmicas y geométricas tanto de la carpeta asfáltica como de la losa de concreto. El modelo se basa en los datos de temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento, variables de entrada con las cuales se desarrolla la interacción térmica dentro de la estructura. El problema se resolvió mediante el método de las diferencias finitas y programando en el Python. La validación de los resultados del modelo numérico arroja errores menores al 0,5% con respecto a los problemas de la literatura de referencia.

Los resultados en los casos de aplicación del algoritmo con base en los datos seleccionados, muestran que se puede considerar el método utilizado como válido para futuros análisis, sin embargo, aún se tienen diferencias considerables en las temperaturas, los cuales pueden atribuirse a la sensibilidad de los instrumentos utilizados para la toma de los datos, la fiabilidad de los mismos y la serie de simplificaciones realizadas que dejan de tomar en cuenta variables influyentes en el comportamiento térmico.

Se puede apreciar una diferencia en la concordancia de los resultados para la mañana y la tarde, este comportamiento de los resultados puede deberse a que la distribución de la temperatura para las horas de la tarde es predominantemente afectada por la radiación solar, mientras que en las horas de la mañana el fenómeno térmico es más sensible a la interacción con el ambiente en conjunción con las variables no estudiadas.

El resultado del análisis se tiene como satisfactorio, ya que la ejecución parte de datos generales de las condiciones ambientales y se logra establecer un comportamiento específico, de cara a una futura simulación con mayor cantidad de datos de referencia se esperan tener valores vez más ajustados a la situación real.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado del Semillero Infraestructura Sostenible de la UAN del Grupo GRESIA- UAN. Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación Ciencia y Tecnología e INNOVACIÓN VCTI – UAN por el apoyo a los semilleros.

REFERENCIAS

- [1] Mintransporte. (2018). Resolución 108. Norma Colombiana de diseño de puentes CCP-2014. Ministerio de Transporte. Colombia.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- [3] Yousong P. y Shizhong Q. (2007). Analytical solution to temperature variations in highway concrete bridges due to solar radiation. En ASCE-International Conference on Transportation Engineering.
- [4] Ghali A. et al. (2011). Concrete structures: Stresses and deformations. CRC Press.
- [5] Bergman T. et al. (2016). Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons.
- [6] Pydata.org. (2022). Pydata.org. Recuperado: <https://pandas.pydata.org/>
- [7] Python.org. (2022). Funciones matemáticas. Documentación Python 3.10.4. Recuperado: <https://docs.python.org/es/3/library/math.html>

- [8] Surhone L. et al. (2010). Numpy. Betascript Publishing.
- [9] Cengel Y. y Ghajar A. (2014). Heat and mass transfer: Fundamentals and applications. McGraw-Hill.
- [10] Rozo L. (2018). Medición de la temperatura superficial in situ para el puente de acceso a la terminal uno del Dorado. Omega.
- [11] Patarroyo L. y Meneses H. (2020). Temperatura superficial in situ en el puente vehicular de la Avenida Américas con Avenida Boyacá (Bogotá) y en el puente intercambiador vial el Tizón (Neiva). Recuperado: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2134>

Análisis dinámico no lineal de puentes de vigas cajón continuas mediante modelos simplificados de un solo grado de libertad

Juan David Bravo¹

José Miguel Benjumea²

Fabián A. Consuegra³

^{1,2}Universidad Industrial de Santander

³Ingetec S.A.

Colombia

Los puentes de vigas cajón continuas con conexiones viga-columna rígidas construidos por voladizos sucesivos son ampliamente utilizados en Colombia, porque que su construcción es aplicable en todo tipo de condiciones topográficas. En el país los puentes se encuentran expuestos a un elevado riesgo sísmico debido al ambiente sismotectónico sobre el que se construyen, una condición que demanda utilizar metodologías de análisis estructural detalladas para estimar de forma precisa el comportamiento sísmico del puente durante la etapa de diseño. El análisis no lineal dinámico NLDA a través de elementos finitos es la metodología más refinada para estimar la respuesta inelástica de estructuras. No obstante, su alto costo computacional la hace ineficiente y poco usada en la práctica. Por esta razón, en esta investigación se evaluó una metodología simplificada, computacionalmente eficiente, para realizar NLDA de un puente de vigas cajón con conexiones viga-columna rígidas. Los modelos simplificados consistieron en sistemas de un grado de libertad SDOF inelásticos que captan la respuesta cíclica del puente mediante las reglas de los modelos de histéresis elástico-perfectamente plástico EPP, Q-Hysteretic QHyst y Pivot. Los desplazamientos calculados mediante los modelos simplificados se comparan contra los calculados mediante NLDA en un modelo detallado de múltiples grados de libertad MDOF. Los resultados mostraron que, mediante modelos SDOF y análisis elásticos, es posible aproximar los desplazamientos sísmicos máximos de puentes viga cajón con conexiones rígidas con una precisión de 2%. En cuanto a la respuesta cronológica se observó que los modelos SDOF inelásticos sobrestiman los desplazamientos en 25%, cuando el modelo MDOF experimenta una demanda de ductilidad cercana a uno, pero los errores se reducen a 8% en el modelo QHyst y a 1% en los modelos EPP y Pivot, cuando las demandas de ductilidad son mayores a 1,75. Entre los modelos de histéresis investigados Pivot presentó el mejor ajuste en términos de desplazamientos para diferentes amplitudes de registros sísmicos.

¹ Ingeniero Civil y Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil.

Contacto: juan2208418@correo.uis.edu.co

² Ingeniero Civil, Magíster y Doctor en Ingeniería Civil y Ambiental.

Contacto: josbenro@uis.edu.co

³ Ingeniero Civil, Magíster y Doctor en Ingeniería Estructural.

Contacto: fabianconsuegra@ingetec.com.co

1. INTRODUCCIÓN

Los puentes de vigas cajón continuas con conexiones viga-columna rígidas CRFBs construidos mediante el método de voladizos sucesivos son ampliamente utilizados en países donde los corredores viales necesitan atravesar zonas montañosas o largos cuerpos de agua, puesto que su proceso constructivo les permite adaptarse a este tipo de condiciones topográficas. Colombia es uno de los países en donde los CRFBs han tenido una fuerte acogida, puesto que gran parte de su territorio está comprendido por las ramificaciones de la cordillera de los Andes, por donde pasan la mayoría de las carreteras principales del país [1]. En una investigación realizada por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [2] estas zonas fueron clasificadas como zonas de riesgo sísmico alto y moderado debido a la presencia de numerosas fallas geológicas activas [3]. Esto implica que parte de la infraestructura vial, incluyendo los CRFBs, se encuentran expuestos a riesgo sísmico considerable [4] y, por lo tanto, resulta necesario hacer un análisis riguroso del comportamiento sísmico de estas estructuras.

Con el avance de la ciencia se han desarrollado varias técnicas para estudiar el comportamiento sísmico de puentes, las cuales convencionalmente se ejecutan a través de modelos numéricos de elementos finitos en donde las estructuras se representan mediante sistemas de múltiples grados de libertad MDOF. El análisis no lineal dinámico NLDA es conocido como la alternativa más refinada para el análisis de estructuras, ya que proporciona resultados de fuerzas y desplazamientos inelásticos ante cualquier acción externa en el dominio del tiempo [5-6]. No obstante, debido al alto costo computacional que demanda implementarla, en las oficinas de diseño optan por emplear metodologías más eficientes, pero menos detalladas como el análisis modal espectral o lineal dinámico LDA.

Esto también se soporta en que la metodología de diseño del código de puentes de Colombia se basa en la estimación de fuerzas sísmicas de diseño, para lo cual basta con este tipo de análisis. Una alternativa para reducir el costo computacional del NLDA es reducir la cantidad de grados de libertad de los modelos. Cuando la respuesta sísmica de los puentes está controlada por el primer modo de vibración y el aporte de los modos de vibración superiores es irrelevante, estas estructuras se pueden representar mediante sistemas de un grado de libertad SDOF [7].

Bravo et al. [8] realizaron un análisis estadístico descriptivo sobre las características geométricas de 28 CRFBs con vigas cajón y columnas huecas construidos en Colombia. Los resultados de ese análisis mostraron que el promedio de la altura de las columnas de los puentes colombianos es menor a 35 m. Algunos investigadores han demostrado mediante ensayos experimentales y modelos computacionales que la distribución de la masa de las columnas huecas de puentes con altura mayor a 30 m y con conexiones viga-columna articuladas pueden influenciar significativamente la respuesta sísmica y, por ende, los modelos SDOF podrían ser insuficientes para capturarla [9-10].

Si los resultados de estas investigaciones fuesen replicables a los CRFBs, se necesitarían modelos MDOF para analizarlos sísmicamente. No obstante, existe evidencia científica que sugiere que mediante modelos SDOF es posible aproximar la respuesta sísmica de CRFBs con vigas cajón. Por ejemplo, Chen et al. [11] compararon los porcentajes de participación de masa de los tres primeros modos de vibración longitudinales de un puente viga cajón con conexiones articuladas y otro con conexiones rígidas, ambos con alturas de columnas superiores a 45 m. Los resultados de este trabajo mostraron que los modos de vibración superiores presentan contribuciones de masa modal del orden de 20% y 11% para los puentes con conexiones articuladas y rígidas, respectivamente.

Esta diferencia entre los porcentajes implica que la contribución sobre los desplazamientos de los modos de vibración superiores es menos representativa en los puentes con conexiones rígidas. [12] y [13] ensayaron en mesas vibratorias dos CRFBs a escala 1:15 y 1:10, cuyas alturas de columnas en los puentes prototipos era de 59 m y 30 m, respectivamente. Los autores encontraron que la respuesta sísmica en sentido longitudinal de los puentes ensayados está controlada por el primer modo de vibración.

Con base en lo mencionado anteriormente, en esta investigación se evalúa una metodología simplificada, implementada en Matlab [14] y basada en sistemas SDOF, para realizar el análisis modal espectral, lineal

dinámico y no lineal dinámico de un puente hipotético con vigas continuas de sección cajón y con conexiones viga-columna rígidas, cuya geometría es representativa de los puentes construidos en Colombia. Los resultados del modelo simplificado se compararon contra los resultados obtenidos en un modelo detallado MDOF desarrollado en OpenSees [15].

2. MÉTODO

2.1 Descripción del caso de estudio

La Figura 1a muestra la configuración del puente hipotético estudiado. Este tiene un vano principal con longitud (L) de 128 m y dos vanos adyacentes de 64 m cada uno. La superestructura consiste en una viga de sección cajón de 11,6 m de ancho, cuya altura varía parabólicamente desde 6,15 m (L/20.8) en las uniones con las columnas hasta 2,5 m en el centro de luz (L/51.2) (Figura 1b). Las columnas tienen una longitud libre (H) de 34 m y su sección transversal es rectangular hueca con paredes de 0,4 m de espesor. La resistencia a la compresión del concreto para el diseño (f_c) de las columnas y de las vigas es de 35 MPa y 42 MPa, respectivamente. El puente se diseñó siguiendo las especificaciones del Código Colombiano de Diseño de Puentes CCP-14 [16], asumiendo empotramientos en la base de las columnas y apoyos simples en los estribos. En la Figura 1c se presenta un esquema de la sección transversal de las columnas, en donde se indica el área bruta de la sección (A_g) y las cuantías de refuerzo longitudinal (ρ_l) y transversal (ρ_{sh}) de cada pared (de la 1 a la 4). Las fuerzas sísmicas de diseño se calcularon mediante el espectro de respuesta de pseudo – aceleración, construido a partir de la relación de amortiguamiento (5%) y de las características del sitio en donde se asumió que se encuentra el puente (Bucaramanga, Colombia, PGA= 0,2, suelo tipo C según la clasificación del CCP-14).

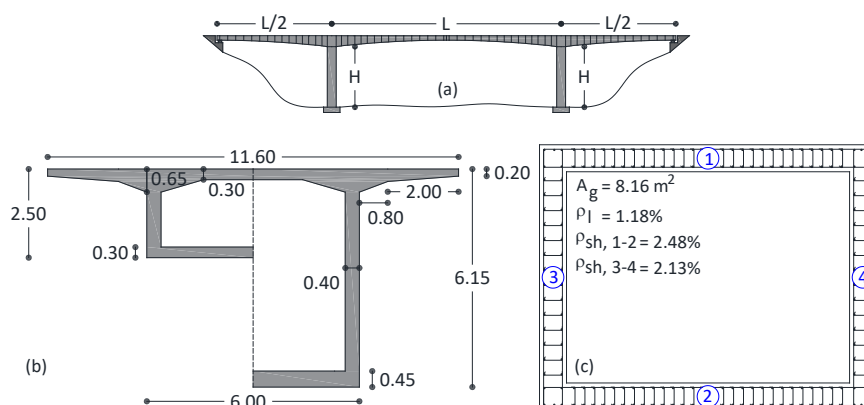


Figura 1. a) Geometría del puente, y b) sección transversal de las columnas

2.2 Modelos detallados

Se construyeron dos modelos de referencia MDOF del puente en estudio en el programa OpenSees: un modelo con elementos elásticos y un modelo que permite capturar la respuesta inelástica del sistema. Este último se denota como modelo MDOF inelástico. Para el modelo elástico, las vigas y columnas se modelaron mediante elementos de tipo ElasticBeamColumn, cuya formulación matemática depende de las propiedades geométricas de las secciones de los elementos y del módulo de elasticidad del concreto.

La inercia bruta de las columnas (I_g) se multiplicó por el factor de reducción (α_K) calculado mediante la ecuación (1), el cual depende del módulo de elasticidad del concreto (E_c), y del momento (M_y) y la curvatura (Φ_y) asociadas al instante en el que ocurre la primera fluencia del acero. Los valores de M_y y Φ_y se obtuvieron del diagrama momento – curvatura de la columna calculado en OpenSees.

$$\alpha_K = \frac{M_y}{E_c I_g \Phi_y} \quad (1)$$

Para el modelo MDOF inelástico se asumió que las vigas permanecen elásticas y que solo las columnas podrían incursionar en el rango plástico. Para esto, las columnas se modelaron mediante elementos de tipo

ForceBeamColumn, los cuales son elementos de plasticidad distribuida que captan la respuesta inelástica de los materiales en fibras localizadas a lo largo del elemento. Cada columna se representó numéricamente mediante 10 elementos sobre los cuales se asignaron tres puntos de integración con algoritmo de solución Gauss-Lobatto. Las vigas y las columnas se localizaron en el centroide de las secciones y se conectaron mediante elementos rígidos de tipo RigidLink. En todos los modelos se despreciaron los efectos de la interacción suelo – estructura asumiendo empotrada la base de las columnas, así como también se ignoraron las deformaciones unitarias cortantes y la pérdida de adherencia del refuerzo en las conexiones. Además, no se simuló el proceso constructivo del puente.

Sin embargo, para representar el estado de esfuerzos generados en las columnas al final de la construcción balanceada del puente, las cargas debido al peso propio de la superestructura fueron simuladas mediante cargas puntuales aplicadas en la parte superior de las columnas. El peso propio de la carpeta de rodamiento y de los acabados se aplicó mediante una carga distribuida de 22,5 kN/m en la superestructura. En la mitad del vano principal se aplicaron fuerzas axiales y momentos flectores para simular los efectos generados por los cables de presfuerzo.

2.2.1 Relaciones esfuerzo–deformación unitaria de los materiales

Las Tablas 1 y 2 muestran las propiedades mecánicas del concreto confinado CONF y no confinado UNCF y las del acero de refuerzo usado en las columnas. Para el acero se utilizaron las propiedades mínimas del acero ASTM A706 Gr. 60 especificadas en la Guía AASHTO LRDF para el Diseño Sísmico de puentes [17]. La resistencia esperada del concreto y la deformación última del concreto no confinado se tomó como $1,3f_c$ y 0.005, respectivamente, como lo sugiere [17]. Dentro de la biblioteca de materiales de OpenSees se encuentran varios modelos para definir las relaciones esfuerzo–deformación. En esta investigación se utilizaron los modelos Concrete02 para el concreto no confinado, Concrete04 para el concreto confinado y Reinforcing-Steel para el acero. En la Figura 2 se presentan esquemas de las relaciones de estos materiales.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del concreto de las columnas

Parámetro	UNCF	CONF
Resistencia esperada a la compresión (MPa)	45,50	68,25
Deformación unitaria asociada al punto de máxima resistencia	0,0020	0,007
Resistencia última a la compresión (MPa)	0,00	52,38
Deformación unitaria asociada a la resistencia última	0,0050	0,0202
Resistencia a la tracción (MPa)	0,00	0,00
Módulo de elasticidad (GPa)	31,70	31,70

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero de refuerzo

Parámetro	Acero
Esfuerzo de fluencia (MPa)	420
Deformación unitaria de fluencia	0,0021
Deformación unitaria al inicio del endurecimiento	0,015
Resistencia última (MPa)	560
Deformación unitaria última	0,12
Módulo de elasticidad (GPa)	200
Tangente al inicio del endurecimiento (GPa)	7

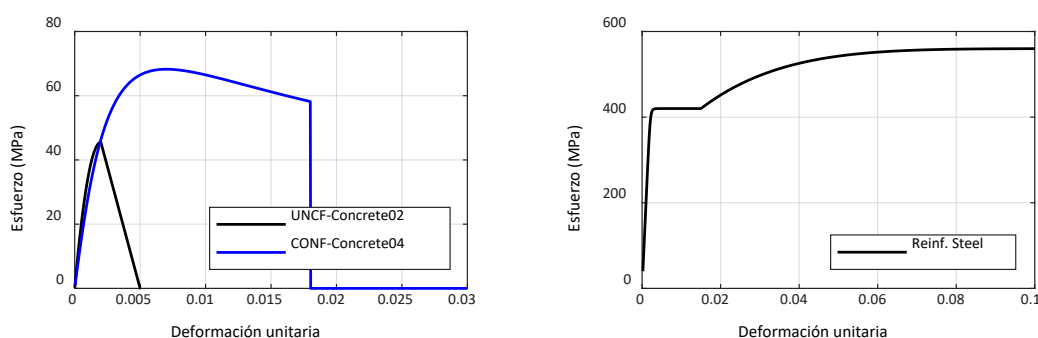


Figura 2. Relaciones esfuerzo–deformación unitaria de los materiales

2.2.2 Selección de los registros sísmicos

Para realizar los análisis dinámicos se emplearon siete registros sísmicos compatibles con el espectro de respuesta de diseño. Existen dos enfoques para modificar las trazas de aceleración de los registros en el dominio del tiempo con la finalidad de ajustar sus espectros de respuesta a un espectro de respuesta objetivo: escalamiento lineal y ajuste espectral [18]. En esta investigación se empleó el escalamiento lineal para modificar las trazas de aceleración horizontales de 23 registros sísmicos extraídos de la base de datos del *Pacific Earthquake Engineering Research Center* [19] con base en las características sismo-geotectónicas del área metropolitana de Bucaramanga [20].

En la Tabla 3 se presentan algunas características de estos registros. Para cada componente de cada registro se construyeron espectros de respuesta de pseudo-aceleración implementando el método numérico de Newmark. Estos espectros se escalaron de tal manera que el error cuadrático medio ECM entre el espectro de respuesta del registro y el espectro de respuesta de diseño fuera mínimo en un intervalo de periodos de $0.5T_f$ y $2.0T_f$, donde T_f es el periodo fundamental del puente en la dirección longitudinal.

Tabla 3. Características de los registros sísmicos

Terremoto	Año	Estación	Mecanismo de falla	Magnitud (M_w)	Int. Arias (m/s)	R_{JB} (km)	R_{Rup} (km)	$t_{5-95\%}$ (s)	V_s (m/s)
1 Helena Montana	1935	Carroll College	Deslizante	6,0	0,1	2,1	2,9	2,5	593,4
2 Mammoth Lakes	1980	Long Valley	Deslizante	5,9	0,7	10,3	18,1	8,4	537,2
3 Coalinga	1983	Oil Fields	Reversa	5,8	0,3	6,3	11,1	8,5	474,2
4 Whittier Narrows	1987	Mt Wilson	R. Oblicua	6,0	0,3	14,5	22,7	9,8	680,4
5 Umbria Marche	1997	Nocera Umbra	Normal	6,0	2,5	8,3	8,9	4,7	428,0
6 Montenegro	1979	Herceg Novi	Reversa	7,1	0,7	23,6	25,6	12,1	585,0
7 Loma Prieta	1989	Gilroy #1	R. Oblicua	6,9	1,7	8,8	9,6	6,5	1428,1
8 Cape Mendocino	1992	Butler Valley	Reversa	7,0	0,4	43,8	45,4	11,1	525,3
9 Duzce	1999	Mudurnu	Deslizante	7,1	0,2	34,3	34,3	16,4	535,2
10 Chi-Chi	1999	TCU011	R. Oblicua	7,6	0,2	74,4	75,2	18,0	471,1
11 Friuli	1976	Tolmezzo	Reversa	6,5	1,2	15,0	15,8	4,9	505,2
12 Iwate	2008	Yamauchi	Reversa	6,9	1,0	25,6	28,4	9,9	561,6
13 Northridge	1994	Santa Susana	Reversa	6,7	0,9	1,7	16,7	8,3	715,1
14 Sierra Madre	1991	Cogswell Dam	Reversa	5,6	0,4	17,8	22,0	3,7	680,4
15 Chuetsu	2007	Iizuna Mure	Reversa	6,8	0,7	66,1	68,3	8,4	526,1
16 Basso Tirreno	1978	Patti	Deslizante	6,0	0,2	14,6	17,4	8,9	441,3
17 Lazio-Abruzzo	1984	Sant' Elia	Normal	5,8	0,2	20,0	24,4	11,9	436,8
18 Parkfield	1966	Temblor Pre-1969	Deslizante	6,2	0,5	16,0	16,0	5,5	527,9
19 Santa Barbara	1978	SB Courthouse	R. Oblicua	5,9	0,2	0,0	12,2	7,5	515,0
20 Livermore	1980	Del Valle Dam	Deslizante	5,8	0,2	23,9	25,0	12,1	403,4
21 Coalinga	1983	Parkfield	Reversa	6,4	0,4	26,2	27,7	12,0	384,3
22 Whittier Narrows	1987	Figueroa St	R. Oblicua	6,0	0,4	6,0	16,5	8,6	364,9
23 Loma Prieta	1989	SF - Cliff House	R. Oblicua	6,9	0,1	78,6	78,7	10,2	614,6

R_{JB} distancia más cercanas desde la estación hasta la proyección en planta de la falla

R_{Rup} distancia más cercanas desde la estación hasta el plano de falla.

M_w magnitud de momento del sismo.

$t_{5-95\%}$ tiempo que tarda en liberarse el 90% de la energía del sismo.

v_s velocidad de onda de cortante del suelo en los últimos 30 metros.

Se seleccionaron los siete registros sísmicos que presentaron menor ECM, excluyendo los registros con factores de escala mayores a cuatro. En la Figura 3 se presentan las trazas de aceleración de los siete registros seleccionados después del escalamiento. En la gráfica de cada registro se relaciona su componente horizontal y los factores de escala empleados. En adelante estos registros se numerarán del uno al siete.

La Figura 4 muestra los espectros de respuesta de los registros seleccionados. Observe que la pseudo-aceleración del espectro promedio de los registros asociada a T_f coincide con la del espectro de diseño del CCP-14. Para periodos menores a T_f la demanda de pseudo-aceleración del espectro promedio es mayor a la del espectro objetivo, mientras que para periodos mayores es lo contrario. Esto indica que durante los análisis inelásticos los desplazamientos del puente podrían ser conservadores dependiendo del periodo resultante del puente después de ejecutar el NLDA.

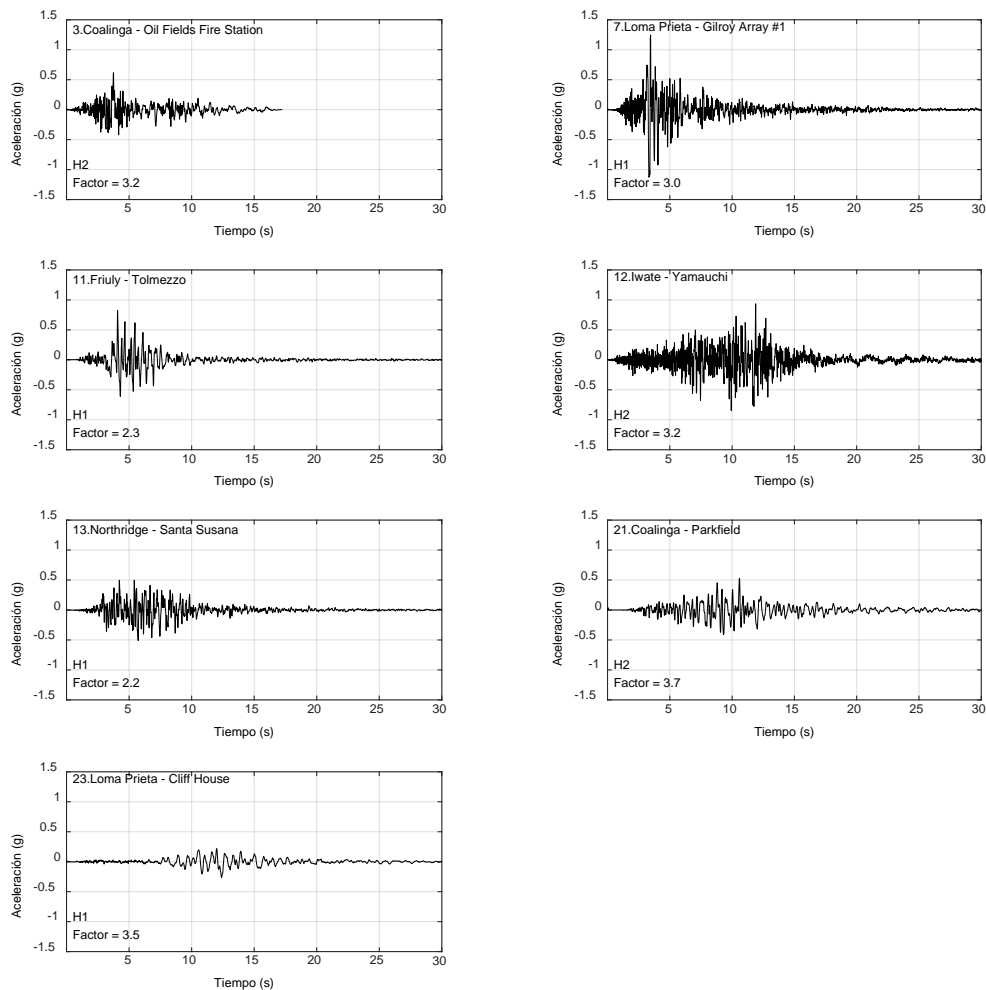


Figura 3. Trazas de aceleración de los registros sísmicos seleccionados.

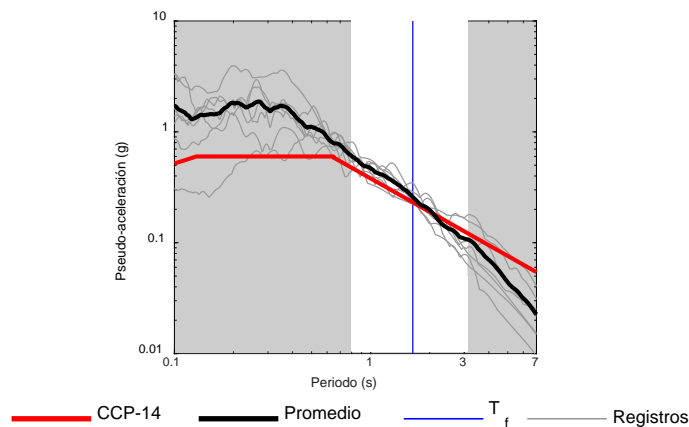


Figura 4. Espectros de respuesta de los registros sísmicos seleccionados

2.2.3 Análisis realizados en los modelos detallados

El puente se analizó sísmicamente en dirección longitudinal. Las características dinámicas y la demanda de desplazamiento espectral (Δ_D) del puente se determinaron mediante el análisis modal y multimodal espectral en el modelo MDOF elástico. Sobre este mismo modelo se realizó el análisis lineal dinámico LDA empleando los registros sísmicos seleccionados mediante los cuales se calculó el promedio entre los desplazamientos máximos del puente durante cada registro (Δ_{LDA}). Posteriormente, en el modelo MDOF inelástico se realizó análisis no lineal estático, también denominado pushover, para calcular la curva de capacidad del puente.

La curva de capacidad se idealizó como bilineal definiendo un tramo inicial con pendiente V_y/Δ_y , que representan el cortante basal y el desplazamiento lateral en el instante que ocurre la primera fluencia del

acero longitudinal de las columnas, y un tramo secundario de resistencia constante entre el desplazamiento de plastificación efectiva (Δ_y) y el último (Δ_u) (Figura 5). El principio de esta idealización se basa en que la energía de deformación después de Δ_y debe ser la misma que la calculada en la curva de referencia. Por último, se calcularon las historias de desplazamientos mediante NLDA para los registros sísmicos seleccionados, el promedio de los desplazamientos máximos del puente (Δ_{NLDA}) y la demanda de ductilidad de desplazamiento (μ_Δ), calculada como Δ_{NLDA}/Δ_y .

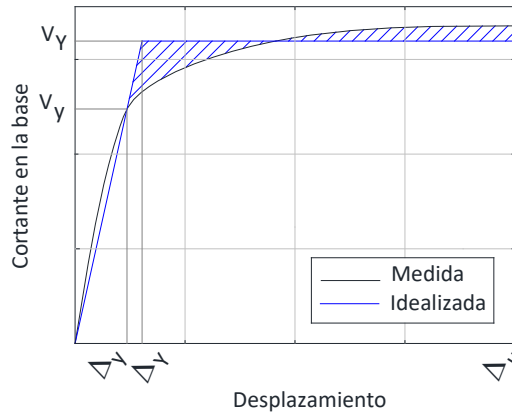


Figura 5. Idealización de la curva de capacidad

2.3 Modelos simplificados

El modelo base sobre el cual se desarrolló el modelo simplificado consistió en un sistema de 17 grados de libertad (Figura 6a), en donde las columnas y las vigas se representaron numéricamente mediante elementos tipo barra siguiendo la teoría clásica de vigas de Euler-Bernoulli, asumiendo que el comportamiento de los materiales es lineal, homogéneo e isotrópico. Las uniones entre las vigas y las columnas se representaron mediante elementos rígidos condicionando las rotaciones en los nodos de estos elementos (grados de libertad de color azul en la Figura 6a). Siguiendo este principio se construyó la matriz de rigidez de cada elemento y posteriormente se ensambló la matriz de rigidez de toda la estructura. La matriz de rigidez de las columnas se construyó siguiendo la teoría de elementos prismáticos. La matriz de rigidez de las vigas se calculó siguiendo la formulación presentada en Tena Colunga [21] para elementos con sección variable, la cual se basa en el método de la flexibilidad. El tamaño de la matriz de rigidez global se redujo mediante condensación estática a un sistema SDOF (Figura 6b), en donde la superestructura se representa mediante una masa concentrada.

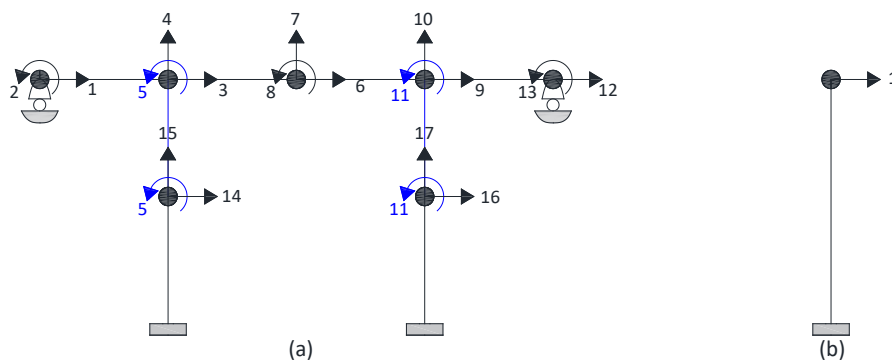


Figura 6. Idealización estructural del modelo simplificado

Esta rigidez se comparó contra la calculada mediante la Ecuación (2), en la cual se asume que la superestructura se comporta como un cuerpo rígido ante cargas laterales, donde n es el número de columnas, H_T es la altura total del puente y E_c es el módulo de elasticidad del concreto. En el sistema SDOF se concentró el 92% de la masa total del puente, correspondiente a la masa de la superestructura más la mitad de la masa de las columnas.

$$K_l = n \frac{12E_c I_g \alpha_K}{H_T} \quad (2)$$

2.4.1 Análisis realizados en los modelos simplificados

La respuesta inelástica del puente se capturó mediante modelos de histéresis que representan la relación fuerza – desplazamiento del puente durante los ciclos de carga y descarga inducidos por los movimientos sísmicos, y cuya envolvente es la curva de capacidad idealizada (Figura 5). Aunque existen varios modelos para representar la respuesta histerética de elementos de concreto reforzado [22], en este trabajo se implementaron tres modelos de histéresis (Figura 7).

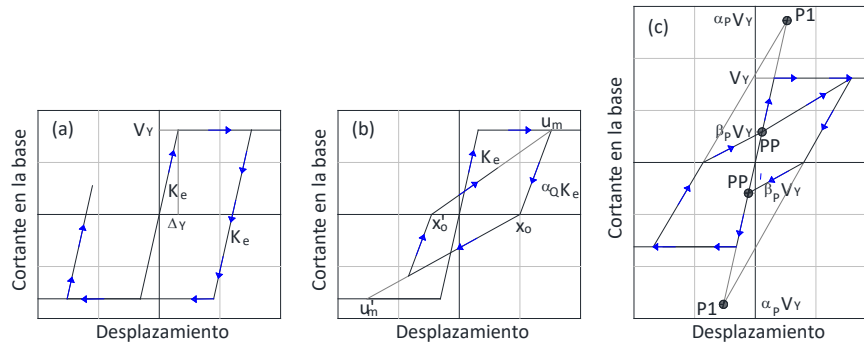


Figura 7. Esquemas de los modelos de histéresis (a) EPP, (b) QHyst y (c) Pivot

El modelo más básico, desarrollado por Veletsos et al. [23], consiste en una relación elástica perfectamente plástica EPP cuya rigidez de carga y descarga es la misma. El siguiente modelo es el denominado Q-Hysteretic QHyst, desarrollado por Saiidi and Sozen [24], en donde la rigidez de descarga depende de la rigidez inicial multiplicada por un factor α_Q , calculado mediante la ecuación (3). Este factor es función de la deformación de plastificación efectiva y de la máxima deformación experimentada por el sistema (u_m). El tercero es el modelo de histéresis "Pivot", desarrollado por Dowell et al. [25]. En este modelo hay dos puntos de pivote que definen la respuesta cíclica del elemento que se está analizando.

$$\alpha_Q = \left(\frac{\Delta Y}{u_m}\right)^{0.5} \quad (3)$$

El primer punto (punto de pivote primario, P1) controla la rigidez de descarga y el segundo punto (punto de pivote de pinching, PP) controla la rigidez de recarga. Ambos puntos se ubican en la línea de trayectoria de la rigidez inicial y son dependientes de la fuerza de plastificación efectiva (V_Y) y de los parámetros α_P y β_P que se calculan con las ecuaciones (4) y (5), según la recomendación de Sharma et al. [26]. El NLDA se realizó para dos niveles de amplitud de los registros sísmicos, a saber, Caso 1: 100% amplitud y Caso 2: 200% amplitud. Esto se hizo con la finalidad de estudiar la precisión de los modelos SDOF ante diferentes niveles de demanda de ductilidad del puente.

$$\alpha_P = 0.170 * (\rho_l) * \left(\frac{P}{f'_{cA_g}}\right)^{-1} + 0.415 \quad (4)$$

$$\beta_P = 0.485 * (\rho_{sh})^{0.2} * \left(\frac{P}{f'_{cA_g}}\right)^{0.25} + 0.115 \quad (5)$$



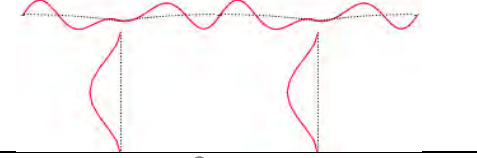

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis multimodal espectral

La Tabla 4 muestra los periodos T , frecuencias angulares ω y formas modales del puente para los tres modos de vibración con mayor participación de masa en el sentido longitudinal, calculados mediante el modelo MDOF elástico, y los mismos resultados para el único modo que captura el modelo SDOF. Según los resultados, la forma predominante de vibración del puente en el modelo MDOF está controlada por el primer modo de vibración, el cual presenta un porcentaje de participación de masa modal de 90,7%. Los modos dos y tres acumularon un porcentaje de participación de 5,0% y el 3,7% restante les correspondió a los modos superiores. La forma modal del primer modo de vibración corresponde a desplazamientos

longitudinales de la superestructura con deformaciones en doble curvatura de las columnas, mientras que en los modos dos y tres los desplazamientos longitudinales no son representativos en comparación con las deformaciones de la superestructura y de las columnas.

Tabla 4. Características dinámicas y demandas de desplazamiento espectral del puente estudiado

Modelo	Modo	T (s)	ω (rad/s)	% Masa	Formas modales	Δ_D (mm)	Δ_{LDA} (mm)
MDOF	1	1.55	4.05	90.7		144	143
	2	0.48	13.01	3.3			
	3	0.09	73.09	2.3			
SDOF	1	1.54 (0.6 %)	4.08 (0.6 %)	92.0 (1.5 %)		146 (0.8 %)	146 (1.9 %)

En la Figura 8 se presentan las historias de desplazamientos del puente durante el sismo #1 y Caso 1, calculadas mediante LDA en el modelo MDOF y para el mismo modelo, pero teniendo en cuenta solo la contribución del primer modo de vibración. Según la figura, mediante el primer modo es posible capturar la totalidad de los desplazamientos del puente. Este resultado se observó con el resto de los registros sísmicos del Caso 1 y 2, lo que indica que los modos de vibración superiores no contribuyen sobre los desplazamientos longitudinales del puente y, por lo tanto, mediante un modelo SDOF es posible capturarlos.

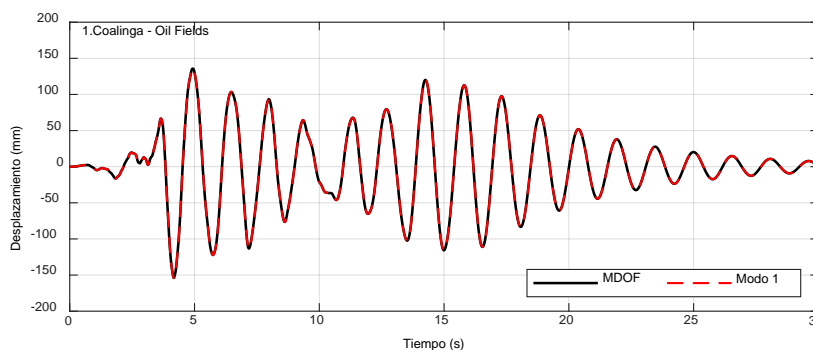


Figura 8. Contribución del primer modo de vibración en los desplazamientos del puente durante el sismo #1

En la Tabla 4 también se presentan las demandas de desplazamiento espectral (Δ_D) y el promedio de los desplazamientos máximos calculados mediante LDA (Δ_{LDA}) en los modelos MDOF y SDOF. Según los resultados, los desplazamientos Δ_D y Δ_{LDA} calculados en ambos modelos presentaron diferencias menores a 2%, lo que indica que el modelo SDOF aproxima con suficiente precisión los desplazamientos máximos calculados mediante el modelo MDOF elástico.

Adicionalmente, a partir de la comparación entre los resultados calculados mediante LDA realizado en ambos modelos (en la Figura 9 se presenta, a modo de ejemplo, los resultados para el sismo #1) se encontró que el modelo SDOF proporciona resultados precisos de los desplazamientos a lo largo del tiempo. La buena correlación entre los desplazamientos de ambos modelos se debe al ajuste que estos presentan

entre sus resultados de T , ω , y el porcentaje de participación de masa del primer modo de vibración (diferencias menores a 1.5%). En el sistema SDOF, T y ω dependen fuertemente de la rigidez lateral del sistema.

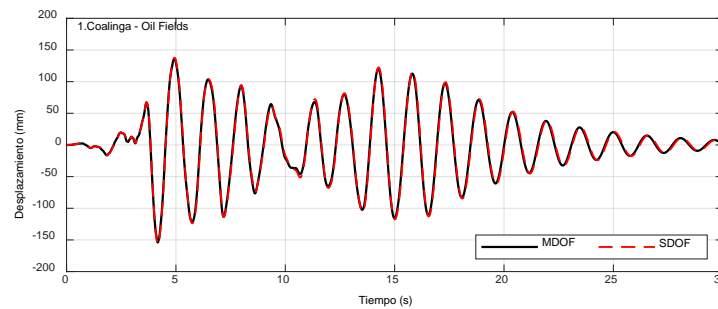


Figura 9. Desplazamientos del puente durante el sismo #1, calculados mediante LDA en el modelo MDOF y SDOF

Empleando condensación estática en el modelo de 17 GDL, la rigidez resultante fue 131 MN/m. Si se usa la ecuación (2), se obtiene una rigidez de 134.2 MN/m, lo que equivale a una diferencia de 3% entre ambas metodologías. Al utilizar la rigidez calculada mediante la ecuación (2), la demanda de desplazamiento espectral del puente es de 143 mm, lo que equivale a una diferencia de 0.5% respecto a la calculada en el modelo MDOF. Por lo tanto, la ecuación (2) aproxima de forma directa y con suficiente exactitud la rigidez lateral del puente y puede usarse para estimar la demanda de desplazamiento espectral en puentes con características similares a las de este estudio.

3.2 Análisis no lineal en los modelos detallados

En la Figura 10 se presentan las curvas de capacidad calculada e idealizada del puente, junto con la demanda de desplazamiento espectral (línea azul). La idealización de la curva de capacidad resultó en $\Delta_y = 126$ mm, con $\Delta_y = 98$ mm. Observe que entre los desplazamientos Δ_y y Δ_y , la rigidez de la idealización es mayor a la de la curva de capacidad. Después de Δ_y la rigidez de la curva de capacidad es mayor que en la curva idealizada hasta un desplazamiento aproximado de 200 mm ($\mu_\Delta = 1,6$). De acuerdo con [22], estas diferencias en la rigidez pueden provocar que los modelos de histéresis bilineales sobreestimen los desplazamientos si la demanda de desplazamientos durante el NLDA es cercana a Δ_y .

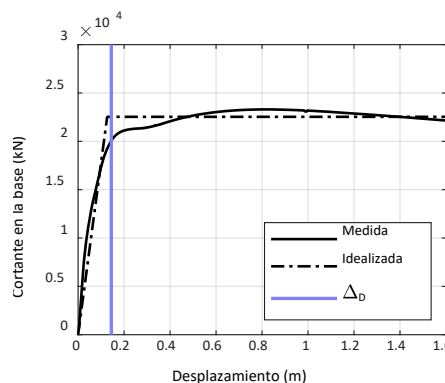


Figura 10. Curvas de capacidad del puente estudiado

En la Tabla 5 se presentan los desplazamientos máximos que experimentó el puente al excitarlo en la base mediante los registros sísmicos seleccionados y para ambos casos de análisis (Caso 1 y Caso 2). Para el Caso 1, el desplazamiento máximo promedio de los registros sísmicos no superó la capacidad de desplazamiento de plastificación efectivo.

Tabla 5. Desplazamientos máximos del puente durante los registros sísmicos calculados en los modelos MDOF

Caso	Desplazamientos máximos durante los sismos (mm)							Δ_{NLDA} (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	
1	142	91	148	91	98	150	128	121
2	373	220	318	342	260	315	287	302

El desplazamiento máximo (150 mm) para este caso se presentó durante el sismo #6. Para el nivel de desplazamiento que experimentó el puente durante este registro, el acero en la cara externa de las paredes 1 y 2 de las columnas (Figura 1) entró en fluencia, presentando una deformación unitaria máxima de 0.0037 (Figura 11a), mientras que en el concreto de recubrimiento apenas superó el esfuerzo equivalente a la mitad de la resistencia máxima (Figura 11b). Según Prado [27], ante este nivel de daño es de esperarse que aparezcan pequeñas fisuras en la base de las columnas debido a la flexión y a lo largo del elemento debido a la fuerza cortante. Para el Caso 2, el desplazamiento promedio máximo del puente aumentó 150% respecto al del Caso 1, representando una demanda de ductilidad promedio (μ_{Δ}) de 2,4. Para este caso, el desplazamiento y la demanda de ductilidad máxima (373 mm equivalente a $\mu_{\Delta}=2.95$) se presentó durante el sismo #1, mediante el cual el acero de la cara externa de las paredes 1 y 2 de las columnas presentó endurecimiento plástico al alcanzar una deformación máxima de 0.022 (Figura 11c) y el concreto de recubrimiento alcanzó la resistencia máxima (Figura 11d).

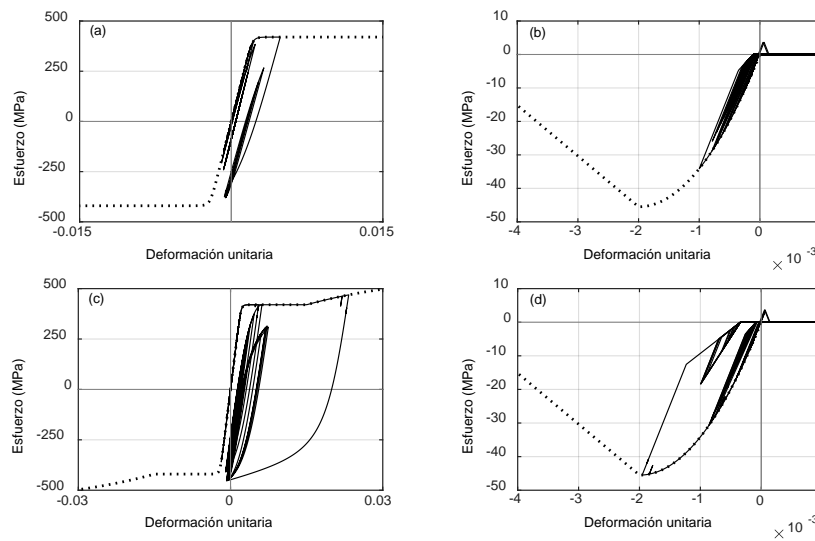


Figura 11. Diagramas de histéresis del acero y del concreto de recubrimiento de las columnas en los cuales ocurren las mayores deformaciones durante los casos 1 y 2

La Figura 12 muestra la historia de desplazamientos y los ciclos de histéresis del puente durante el sismo #1 de este caso. A pesar del aumento en la demanda de ductilidad, las deformaciones permanentes del puente son cercanas a cero. Esto se debe a que el puente solo presentó un ciclo con una deformación alta y durante la reversión de la carga el fenómeno de "pinching" recentró la estructura. Esta respuesta se presentó durante la mayoría de los registros del Caso 2.

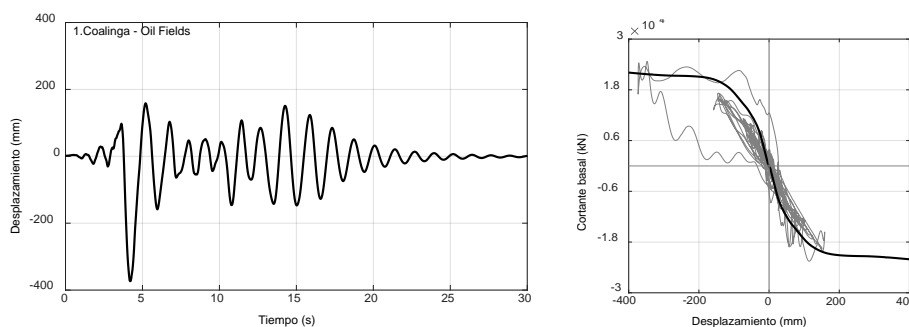


Figura 12. Historia de desplazamientos y diagrama de histéresis del puente durante el sismo #1 del Caso 2

3.3 Análisis no lineal en los modelos simplificados

En la Tabla 6 se presentan los promedios de los desplazamientos máximos calculados mediante NLDA (Δ_{NLDA}) en los modelos SDOF, para ambos casos de análisis y para cada uno de los modelos histéricos que fueron estudiados. Los resultados para el Caso 1 muestran que los modelos de histéresis sobrestiman los desplazamientos del modelo de referencia en aproximadamente 25%, con una diferencia máxima de 26,7% para el modelo QHyst. Esta diferencia se da porque la demanda de los desplazamientos máximos durante los registros sísmicos es cercana, pero menor, al desplazamiento de plastificación efectivo (Δ_y).

Tabla 6. Promedio de los desplazamientos máximos del puente durante los registros sísmicos calculados en los modelos SDOF

Caso	Δ_{NLDA} (mm)			
	MDOF	EPP	QHyst	Pivot
1	121	149 (23,5 %)	153 (26,7 %)	152 (26,0 %)
2	302	301 (0,4 %)	328 (8,5 %)	305 (0,9 %)

En la Figura 13 se muestran las historias de los desplazamientos y los ciclos de histéresis del puente para los sismos en los que se presentaron los menores (sismo #4) y mayores (sismo #6) desplazamientos del Caso 1. Durante el sismo #4, el desplazamiento máximo obtenido en el modelo MDOF fue 91 mm, el cual es un desplazamiento menor que Δ_y . El hecho de que la rigidez de los modelos simplificados sea menor a la del modelo MDOF en la zona en que la demanda de desplazamientos es menor a Δ_y (Figura 10) explica por qué los desplazamientos máximos de los modelos de histéresis durante el sismo #4 fueron 20% mayores al del modelo MDOF. En los modelos SDOF, el desplazamiento máximo durante este sismo (114 mm) no superó el desplazamiento de plastificación efectiva (Δ_y). Por lo tanto, la respuesta del puente es elástica y las historias de desplazamientos de los modelos simplificados (EPP, QHyst y Pivot) son las mismas.

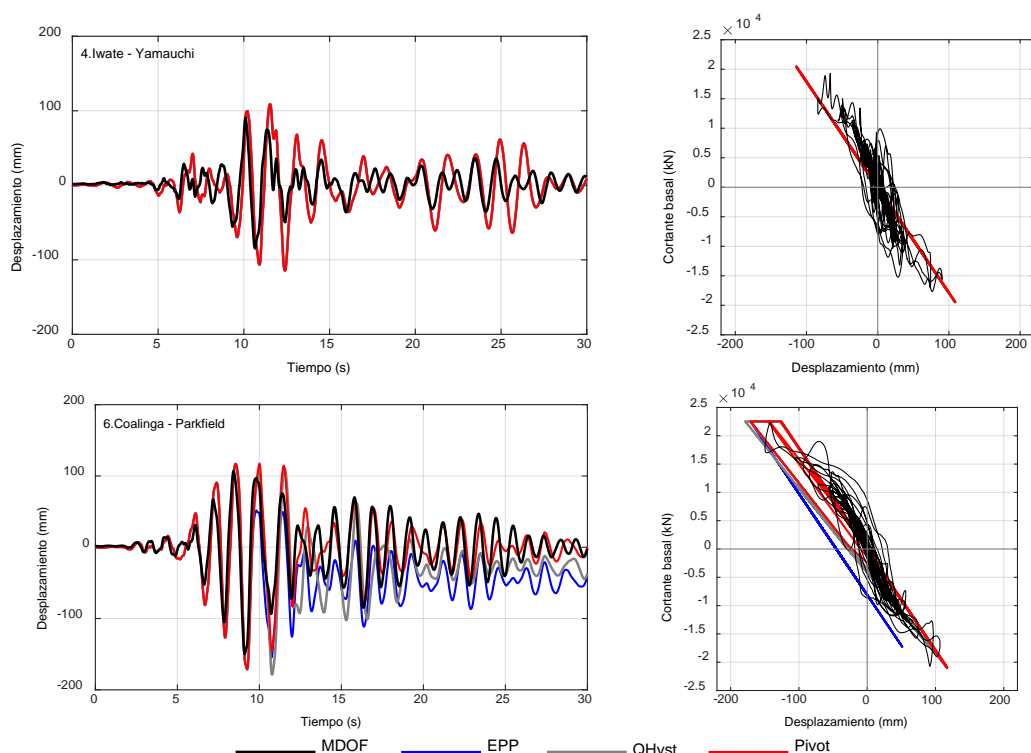


Figura 13. Historias de desplazamientos y ciclos de histéresis del puente durante los registros #4 y #6 del Caso 1

Durante el sismo #6, los desplazamientos máximos calculados mediante los modelos simplificados sobrestiman en 14,5% el desplazamiento máximo calculado en el modelo MDOF (150 mm). Esta diferencia se da porque a pesar del aumento en la demanda de ductilidad el desplazamiento máximo de los modelos es cercano a Δ_y . Según [22], es preferible emplear modelos de histéresis que tengan en cuenta el agrietamiento del concreto cuando la demanda de desplazamientos de los análisis no lineales es cercana a Δ_y . Por otro lado, note que en las historias de desplazamiento de los modelos EPP y QHyst durante el sismo #6 el puente presenta un desfase respecto del modelo MDOF después de $t=10$ s. Este desfase se debe a que en estos modelos de histéresis no se tiene en cuenta el fenómeno de "Pinching" que causa el recentramiento del puente. Para este sismo el modelo Pivot proporcionó los resultados de desplazamientos más precisos a lo largo del tiempo respecto a los calculados con el modelo MDOF.

Para el Caso 2, los modelos simplificados EPP y Pivot presentan diferencias menores a 1% respecto al desplazamiento máximo promedio calculado en el modelo MDOF, mientras que para el modelo QHyst la diferencia es de 8,5% (Tabla 6). La mejoría en la estimación de los desplazamientos máximos mediante los modelos simplificados para el Caso 2, respecto a las diferencias que se presentaron en el Caso 1, se debe al mejor ajuste entre la rigidez de los modelos simplificados después de Δ_y y la rigidez del modelo MDOF

asociada a las demandas de desplazamiento de cada registro (302 mm en promedio). Esto demuestra que al aumentar la demanda de ductilidad los modelos de histéresis bilineales proporcionan mejores resultados de los desplazamientos máximos que cuando la demanda de ductilidad es cercana o menor a uno.

Las gráficas de la Figura 14 muestran las historias de los desplazamientos y los ciclos de histéresis del puente durante los registros sísmicos #1 y #2 del Caso 2, para los cuales se presentaron el mayor y menor desplazamiento máximo en el modelo MDOF, respectivamente. Este último representó una demanda de ductilidad de 1.75. Durante ambos registros, los modelos simplificados capturan de forma casi perfecta el desplazamiento máximo del modelo MDOF.

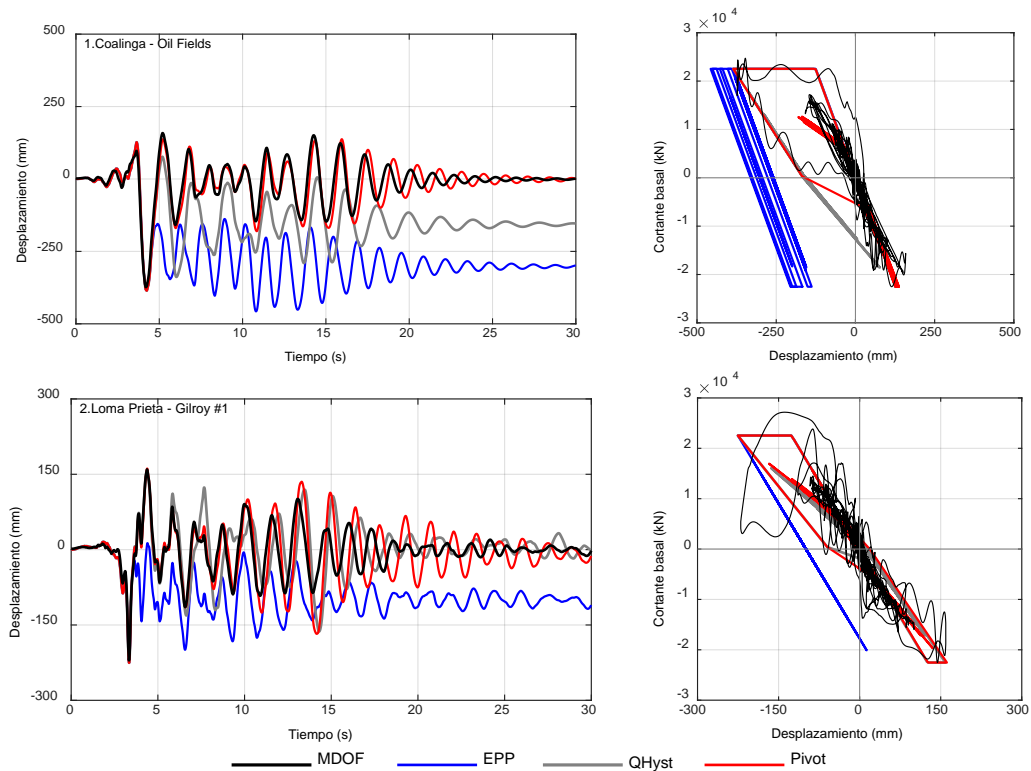


Figura 14. Historias de desplazamientos y ciclos de histéresis del puente durante los registros #1 y #2 del Caso 2

Sin embargo, después de este desplazamiento los modelos QHyst y EPP presentan deformaciones permanentes que son inexistentes en el modelo de referencia. Este desfase se presentó durante todos los registros sísmicos del Caso 2 y durante los registros del Caso 1 que presentaron desplazamientos mayores a Δ_Y , lo que indica que los modelos QHyst y EPP son inapropiados para estimar la respuesta inelástica durante eventos sísmicos de CRFBs con vigas de sección cajón y geometría convencional. Por otro lado, el modelo Pivot proporcionó un buen ajuste en las historias de desplazamientos del puente durante todos los registros sísmicos del Caso 2, indicando que mediante este modelo de histéresis es posible aproximar con suficiente precisión los desplazamientos máximos y la historia de desplazamiento de los CRFBs con vigas de sección cajón y de geometría convencional durante eventos sísmicos de gran intensidad.

3.4 Costo computacional del NLDA

En la Tabla 7 se presenta el promedio del tiempo que tardaron en ejecutarse los NLDA para los Casos 1 y 2 en los modelos MDOF y SDOF. Estos modelos se ejecutaron en un computador de gama comercial típico en las oficinas de diseño, el cual cuenta con una unidad de almacenamiento moderna en estado sólido, memoria de acceso aleatorio RAM de 8 GB y procesador de la marca Intel® Core i5 de octava generación. Mediante el modelo MDOF el equipo requirió en promedio 1200 s (20 minutos) y 1800 s (30 minutos) para resolver los NLDA de los Casos 1 y 2, respectivamente. Estos mismos análisis tardaron aproximadamente 15 y 20 segundos en los modelos SDOF. Es decir, menos de 2% de lo que tardaron los modelos de referencia. Adicionalmente, observe que el aumento en el tiempo de computo entre los Casos 1 y 2 del modelo MDOF fue significativo (600 s, lo que equivale a 10 minutos), en comparación al aumento que se presentó en el modelo SDOF. Esto demuestra que los modelos SDOF desarrollados en esta investigación son eficientes

computacionalmente para diferentes niveles de demanda de ductilidad de los puentes y pueden ser implementados en computadores de gama media y baja.

Tabla 7. Tiempo promedio que tardaron en ejecutarse los NLDA

Modelo	Tiempo promedio de análisis	
	Caso 1	Caso 2
MDOF	1800	2700
SDOF	15	20

4. CONCLUSIONES

En esta investigación se usó una metodología simplificada computacionalmente eficiente, desarrollada en el *software* Matlab para realizar análisis no lineal dinámico NLDA de un puente de vigas cajón continuas con uniones viga-columna rígidas cuya geometría es representativa de los puentes colombianos. La metodología consistió en sistemas de un grado de libertad SDOF que captan la respuesta cíclica de la estructura durante eventos sísmicos, siguiendo las reglas de los modelos de histéresis elástico-perfectamente plástico EPP, Q-Hysteretic QHyst y Pivot. Los resultados de los modelos simplificados se compararon y validaron con un modelo detallado de múltiples grados de libertad MDOF desarrollado en el programa de elementos finitos OpenSees en donde se incluyó la inelasticidad en los materiales de las columnas. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

1. El modelo SDOF aproxima con suficiente precisión la demanda de desplazamiento espectral en la dirección longitudinal del puente estudiado debido a que el modo fundamental de vibración del modelo MDOF presenta un porcentaje de participación modal superior a 90% en dicha dirección, y los modos de vibración superiores no contribuyen significativamente a los desplazamientos laterales de la superestructura.
2. Cuando la relación entre el desplazamiento máximo calculado mediante NLDA y el desplazamiento de plastificación efectivo (también denominada demanda de ductilidad de desplazamiento) es menor a 1.2, los modelos simplificados SDOF que integran los modelos de histéresis EPP, QHyst, y Pivot sobrestiman los desplazamientos máximos debido a que la rigidez instantánea del sistema asociada a esta demanda de ductilidad es cero, generando la sobreestimación del desplazamiento lateral. Esto no ocurre en los modelos MDOF, donde la rigidez asociada a esta demanda de ductilidad es menor a la rigidez inicial, pero mayor a cero.
3. Cuando el puente experimenta una demanda de ductilidad mayor a 1.75 durante los análisis NLDA, el modelo SDOF que integra el modelo de histéresis de Pivot proporciona desplazamientos con un alto nivel de precisión respecto a aquellos calculados mediante el modelo MDOF. Los modelos simplificados que integran los modelos QHyst y EPP capturan los desplazamientos máximos durante los eventos sísmicos, pero durante la reversión de la carga estos modelos conservan deformaciones permanentes que no se presentan en el modelo MDOF, evidenciando que dichos modelos simplificados no son apropiados para estudiar la respuesta sísmica de puentes de vigas cajón continuas con conexiones rígidas con geometría convencional sometidos a sismos fuertes.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de los resultados del proyecto de investigación titulado Desplazamiento sísmico inelástico de puentes de voladizos sucesivos en Colombia durante construcción y en condición terminada, el cual es financiado por la Universidad Industrial de Santander, UIS. Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS y al grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción, INME por proveer los recursos necesarios para desarrollar la investigación.

REFERENCIAS

- [1] Inviás. (2022). Mapa de Carreteras de Colombia. Recuperado: <https://hermes.invias.gov.co/carreteras/>
- [2] AIS. (2009). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Bogotá.

- [3] Paris G. y Romero J. (1993). Fallas activas en Colombia. *Boletín Geológico Ingeominas* 2(34), 3–25.
- [4] Salgado M. et al. (2015). Probabilistic seismic hazard assessment of Colombia with updating purposes of the Warthquake-Resistant Building code for bridges CCP-14. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería* 4(32), 230-239.
- [5] Zong Z. et al. (2016). Collapse failure of prestressed concrete continuous rigid-frame bridge under strong earthquake excitation: testing and simulation. *Journal of bridge engineering* 9(21), 04016047.
- [6] Dhakal R. P. et al. (2006). Identification of critical ground motions for seismic performance assessment of structures. *Earthquake engineering and structural dynamics* 8(35), 989-1008.
- [7] Isaković T. et al. (2003). Bridges: When is single mode seismic analysis adequate? *Structures and buildings* 2(156), 165–173.
- [8] Bravo J. et al. (2021). Parametric study to estimate seismic displacement demands of balanced cantilever bridges in service and construction conditions. En *fib Symposium - Concrete Structures: New Trends for Eco-Efficiency and Performance*. Lisboa, Portugal.
- [9] Tubaldi E. et al. (2014). Seismic response analysis of slender bridge piers. *Earthquake engineering and structural dynamics* 43(4), 1503–1519.
- [10] Chen X. et al. (2018). Shake table tests of tall-pier bridges to evaluate seismic performance. *Journal of bridge engineering* 9(23), 04018058.
- [11] Chen X. y Guan Z. (2020). Extension of a simplified procedure for estimating nonlinear seismic responses of tall pier bridge systems. *European journal of environmental and civil engineering* 8(26), 3238-3257.
- [12] Zong Z. et al. (2016). Collapse failure of prestressed concrete continuous rigid-frame bridge under strong earthquake excitation: testing and simulation. *Jouranal of bridge engineering* 9(21), 04016047.
- [13] Lin Y. et al. (2020). Seismic performance of steel-concrete composite rigid-frame bridge: shake table test and numerical simulation. *Journal of bridge engineering* 25(7), 04020032.
- [14] MathWorks (2022). Matrix Laboratory software. Recuperado: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [15] McKenna F. et al. (2010). Nonlinear finite-element analysis software architecture using object composition. *Journal of computing in civil engineering* 1(24), 95-107.
- [16] AIS. (2014). Norma Colombiana de Diseño de Puentes. Bogotá.
- [17] AASHTO. (2011). AASHTO guide specifications for LFRD seismic bridge design. Apress.
- [18] Alatik L. y Abrahamson N. (2010). An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake spectra* 3(26), 601-617.
- [19] Ancheta T. et al. (2013). PEER NGA-West2 Database. PEER Report 2013-03. California.
- [20] INGEOMINAS. (2001). Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. Bogotá.
- [21] Tena A. (2007). Análisis de estructuras con métodos matriciales. Editorial LIMUSA.
- [22] Sengupta P. y Li B. (2017). Hysteresis modeling of reinforced concrete structures: State of the art. *ACI structural journal* 1(114), 25-38.
- [23] Veletsos A. S. et al. (1965). Deformation spectra for elastic and elastoplastic systems subjected to ground shock and earthquake motions. En *3rdWorld Conference on Earthquake Engineering*. Nueva Zelanda.
- [24] Saiidi M. y Sozen M. (1979). Simple and complex models for nonlinear seismic response of reinforced concrete structures. Illinois.
- [25] Dowell R. (1998). Nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete bridge structures. Doctoral dissertation. University of California.
- [26] Sharma A. et al. (2013). Pivot hysteresis model parameters for reinforced concrete columns, joints, and structures. *ACI structural journal* 2(110), 217–227.
- [27] Prado N. (2014). Comportamiento de pilas huecas de concreto reforzado de puentes ante carga lateral cíclica. *Disertación doctoral*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Diagnóstico al reflujó en un sistema de alcantarillado pluvial y sanitario

Cesar Divantoque Martínez¹

Universidad de la Salle
Colombia

Este capítulo tiene como finalidad identificar la causa por la cual se presenta reflujó en el sistema de alcantarillado del barrio Isla del Sol, colindante con el río Tunjuelo en Bogotá, Colombia. Se determinaron las condiciones actuales del sistema de alcantarillado empleando la metodología establecida en el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico; de igual manera, se estableció la interacción comprendida entre la descarga del sistema de alcantarillado, tanto pluvial como sanitario, con los niveles del río, y se empleó el software EPA SWMM para determinar las condiciones críticas de operación del sistema de alcantarillado. Se evidencia un problema de reflujó en la red de alcantarillado pluvial y sanitario en el barrio, por lo que es necesario determinar la causa por la que se está generando. Por otro lado, se busca determinar la incidencia que tiene el río Tunjuelo en el problema de reflujó en la red de alcantarillado, ya que es necesario determinar los posibles efectos que se generan en dicha red a causa de la cercanía con el río. Los resultados de esta investigación aportan al entendimiento de la causa por la cual se está presentando dicho reflujó, para lo cual se aplicó la modelación y simulación de la red de alcantarillado pluvial y sanitaria del barrio. Se realizó el cálculo de los caudales para las redes de alcantarillado sanitario y pluvial, así mismo se utilizó la topología de la red de alcantarillado disponible en el geo portal de la Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá, y para la determinación de la dotación y el censo del barrio se aplicó una encuesta en la que se indagó sobre el número de habitantes por vivienda, consumo de agua potable según facturación y antecedentes de inundaciones o reflujó en los sistemas de alcantarillado. El caudal pluvial se determinó aplicando el método racional, con los respectivos coeficientes de escorrentía y curvas IDF, construidas con registros históricos de la estación hidrológica Tunjuelo. Se realizó la verificación de los niveles del río por medio de la estación limnimétrica río Tunjuelo autopista del sur, y se verificó la precipitación por medio de las estaciones pluviométricas Col. La Chucua y la estación Tunal Candelaria. En cuanto a la interacción entre la descarga del sistema de alcantarillado y los niveles del río, se realizó inspección en campo de las obras de descarga y se incluyeron los niveles máximos para distintos períodos de retorno, según modelaciones hidráulicas desarrolladas por la EAAB. Como resultado se identificaron las condiciones de operación y tramos críticos del sistema de alcantarillado producto del reflujó, incluyendo sus posibles causas.

¹ Ingeniero Civil.

Contacto: cdivantoque93@unisalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB ha realizado distintas intervenciones en el cauce del río Bogotá, con las cuales se modificó su morfología y se afectaron los niveles de agua, ocasionando niveles de agua superiores a los que se generarían naturalmente tanto en el río Bogotá como en sus afluentes, como es el caso del río Tunjuelo, condición que se traduce en mayor riesgo de inundación en la ciudad de Bogotá [1]. El barrio Isla del Sol se localiza en la localidad de Tunjuelito sobre la planicie aluvial del río Tunjuelo, e históricamente se han presentado eventos de encharcamiento e inundación afectando alrededor de 37 ha aledañas al río, razón por la cual se construyó el embalse Cantarrana como una medida para contener las grandes cantidades de agua generadas por lluvias y así controlar en gran medida las inundaciones que se han presentado en dicha localidad a lo largo de los años [2].

El río Tunjuelo no ha sido ajeno a la modificación del cauce original para dar paso a actividades de urbanización, minería e infraestructura, reduciendo en un 50% la longitud del cauce y las áreas de amortiguación, así como la canalización de quebradas como la Fiscala y parcialmente la canalización de la quebrada Chiguaza, de igual manera se generó la eliminación de tres meandros los cuales en la actualidad corresponden a los barrios el Playón, la Playa, y la Playita, de igual manera en el barrio Isla del Sol se realizó el desvío del curso del río con el fin de evitar inundaciones, es de importancia resaltar que dicha área sigue siendo susceptible pues se encuentra en la zona de amortiguación natural del río Tunjuelo.

La explotación de canteras en Ciudad Bolívar genera que la localidad de Tunjuelito este en constante riesgo de inundación debido a que ocasionan que el río Tunjuelo duplique su nivel a causa de la sedimentación que estas generan. Producto de la urbanización de áreas localizadas por debajo de la cota del río Tunjuelo, es común que los sistemas de alcantarillado no cuenten con una cota mínima que evite el refluo de las aguas residuales y pluviales por el efecto de la gravedad y por el aumento en los niveles del río. Razón por la cual, en algunas zonas ha sido necesario implementar estaciones de bombeo y sistemas de contención que complementan el sistema de alcantarillado. El barrio Isla del Sol es un área en la cual se presenta una gran densidad poblacional, debido a que en los principios de dicho barrio se asentaron familias en esta zona de manera ilegal, al pasar el tiempo, aunque el barrio se legalizó, muchas de las casas aún se encuentran expuestas a posibles inundaciones al estar localizadas por debajo del nivel del río Tunjuelo.

Muestra de ello, es que en 2002, entre el 31 de mayo y el 10 de junio, se presentaron tres eventos de inundación los cuales generaron un cambio en el cauce o caudal del río Tunjuelo en el sector de canteras, lo cual genero afectaciones en los barrios Tunjuelito, Meissen y San Benito en los que se generó inundación; de igual manera en los barrios José Antonio Galán, Isla del Sol, Villa Nohora y Nuevo Muzu se presentó refluo en la red de alcantarillado [2], razón por la cual, algunos de los barrios de la localidad de Tunjuelito como los son San Benito e Isla del Sol se encuentran catalogados como zonas de riesgo no mitigable.

Cabe aclarar que las inundaciones no solo se refieren al desbordamiento del río Tunjuelo, sino que también a la incapacidad de evacuar las aguas por el sistema de alcantarillado o bien hacia el sistema de drenaje, caso en el cual los sistemas de alcantarillado colapsan. En los últimos años se presentaron más de 130 reportes de mantenimiento al sistema de alcantarillado por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, lo cual evidencia problemas de insuficiencia de drenaje en la red que deben ser evaluados técnicamente como insumo para la formulación de obras y medidas de mitigación, cabe aclarar que la red de alcantarillado ubicado en el barrio Isla del Sol se encuentra separado, por tanto el alcantarillado sanitario se proyecta descargar a un colector, mientras que la red pluvial descarga al río Tunjuelo por lo que será el enfoque del proyecto.

2. MÉTODO

2.1 Fase I. Antecedentes de eventos de refluo en el sistema de alcantarillado

En esta etapa se realizó la búsqueda, así como la recopilación de los datos necesarios para el correcto desarrollo del proyecto, en donde se evidenció que actualmente se presenta refluo en la red de alcantarillado pluvial y sanitario del barrio Isla del Sol. Las fuentes básicas de información son:

- Base de datos Centro de recursos para el aprendizaje y la investigación CRAIUSTA, repositorio Universidad Santo Tomas, Sistema de información para la gestión del riesgo y cambio climático SIRE, Secretaria distrital de planeación, repositorio institucional Universidad Católica de Colombia RIUCaC, Acueducto y alcantarillado de Bogotá, Alcaldía de Bogotá, Instituto distrital de gestión de riesgos y cambio climático IDIGER, Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM, repositorio Universidad Piloto de Colombia, reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico siguiendo los lineamientos de Resolución 0330 de 2017.
- Encuesta a habitantes del barrio Isla del Sol sobre eventos de reflujo o inundación.

2.2 Fase II. Procesamiento de información

En esta etapa se procesaron los datos previamente recolectados con el fin de establecer un histórico del reflujo presentado en la red de alcantarillado en el barrio Isla del Sol. Los eventos fueron representados espacialmente cuantificando su recurrencia.

2.3 Fase III. Cálculo de caudal sanitario

Se realizó una encuesta en el barrio Isla del Sol con el fin de determinar el número de habitantes por usuario, la dotación según facturación de la EAAB y censo de las viviendas. Los datos obtenidos en la encuesta fueron procesados, siguiendo los lineamientos de Resolución 0330 de 2017 para calcular el caudal de cada tramo del alcantarillado sanitario, se realiza un total de 500 encuestas en el barrio ya que corresponde al 5% de la población.

2.4 Fase IV. Cálculo de caudal pluvial

En esta etapa se realizó el cálculo del caudal pluvial para el diseño de la red de alcantarillado pluvial con lo cual se empleó el método racional teniendo como base los lineamientos de la Resolución 0330 de 2017 pluviométrica Tunal Candelaria, Se realizó una visita de campo en la cual se observó la forma en la que actualmente se realiza el drenaje del alcantarillado pluvial hacia el río Tunjuelo, con el fin de determinar el posible uso de bombas.

2.5 Fase V. Verificación de la red de alcantarillado

En esta fase se realizó la verificación del diseño de la red de alcantarillado con los datos de dotación y censo obtenidos previamente a través de la encuesta realizada en el barrio Isla del Sol, así mismo se toma la información del geoportal de la EAAB para identificar los diámetros existentes, el diseño construido y las direcciones de flujo

2.6 Fase VI. Revisión diseño red de alcantarillado

Se revisó del diseño actual de la red de alcantarillado pluvial y sanitario con la cual cuenta el barrio Isla del Sol con el fin de determinar posibles errores por los cuales se presenta reflujo en dicha red, de igual manera se toma información de la red construida del geoportal de la EAAB.

2.7 Fase VII. Determinar incidencia del río Tunjuelo

En esta fase se determinó la incidencia que tiene el río Tunjuelo debido a su cercanía con el barrio Isla del Sol, particularmente se identifican los posibles efectos del río Tunjuelo en el reflujo de la red de alcantarillado.

2.8 Fase VIII. Modelación EPASWMM

En esta fase se realizó la simulación y modelación de un tramo de la red de alcantarillado pluvial y sanitario del barrio Isla del Sol por medio del software EPASWMM.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Encuesta

Cabe destacar que en cuanto a la encuesta realizada en el barrio Isla del Sol de Bogotá, la cual fue realizada a un total de 500 suscriptores se obtuvo como resultado los escenarios de la Tabla 1. Con esta encuesta se puede evidenciar que de acuerdo a las declaraciones de las personas que fueron objeto de la encuesta en mención se obtuvo que en el barrio Isla del Sol se presenta un total de 365 personas las cuales manifestaron que en la zona en la cual se encuentra su residencia no se presenta inundación los cuales de acuerdo con el diagrama mostrado a continuación corresponde al 75% de las personas encuestadas, es de importancia mencionar que estas personas manifestaron que en otras zonas del barrio Isla del Sol si se suelen presentar inundaciones, lo cual se puede observar a continuación, en donde se relaciona algunas imágenes suministradas y tomadas durante la realización de las encuestas, en donde se puede evidenciar algunas de las zonas que son objeto de inundación.

Tabla 1. Escenarios encuesta barrio Isla del Sol

Escenario	Cantidad
No se presenta inundación	365
Cada 5 meses	26
Cada 6 meses	35
1 vez al año	23
En invierno / Cada que llueve	32
Cada 3 meses Colapso pozos de inspección	14
Otro	5

Así mismo, cabe mencionar que en el grupo de suscriptores objeto de investigación un total de 26 personas manifestaron que cada 5 meses se presenta inundación en la zona en la cual se encuentra su residencia, lo cual correspondería al 5% de la población encuestada en el barrio Isla del Sol, como se observa en el siguiente diagrama. En cuanto a las personas encuestadas se obtuvo como resultado que un total de 35 personas manifestaron que en el área en la cual se ubica su residencia se suele presentar inundación aproximadamente cada 6 meses, con lo cual cabe mencionar que esto correspondería al 7% de la población encuestada. Así mismo se obtuvo como resultado que de las 500 personas encuestadas un total de 23 personas manifestaron que en la zona donde se encuentra su residencia se presentan inundaciones aproximadamente una vez al año, lo cual como se observa en el gráfico de torta correspondería al 5% de los encuestados en el barrio Isla del Sol.

Cabe mencionar que de las personas encuestadas un total de 32 personas manifestaron que en el área donde se encuentra localizada su residencia se presenta inundación cada vez que se presentan lluvias de alta intensidad o en época de invierno, con lo cual cabe mencionar que estos encuestados corresponderían al 6% de los encuestados. Por otro lado, del total de las personas encuestadas se pudo establecer que un total de 14 personas manifestaron que en el área donde se encuentra su residencia se presenta inundación cada 3 meses lo cual según las personas encuestadas se presenta debido al colapso de los pozos de inspección, lo cual correspondería al 3% de la población encuestada en el barrio Isla del Sol.

En cuanto a un total de 5 personas encuestadas del total del grupo de 500 encuestados se encontró que en el área donde se ubica su residencia se presenta otros escenarios por los cuales se presentan inundaciones en dicha área, encontrando así que según este grupo de personas encuestadas dichas inundaciones son ocasionadas por la construcción del Jarillón el cual según las personas encuestadas es el causante de que se presenten dichas inundaciones, así mismo cabe mencionar que otro escenario manifestado por las personas objeto de estudio correspondería a que las cajas de inspección no colapsan si no que dicha inundación es ocasionada por el río cuando se aumentan los niveles del mismo, cabe mencionar que de acuerdo al siguiente diagrama esto correspondería al 1% de las personas encuestadas.

Con lo anterior es importante mencionar que un total del 27% de los encuestados manifestaron que en la zona en donde se encuentra ubicada su residencia se presenta inundación en un lapso igual o inferior a un

año, con lo cual es de importancia resaltar que las zonas de inundación en el barrio Isla del Sol corresponde a un porcentaje alto.

Como resultado de los escenarios anteriormente expuestos se obtuvo un gráfico en el cual se establecen los porcentajes en los que se presentan estos escenarios según el grupo de suscriptores encuestados en el barrio Isla del Sol.



Figura 1. Porcentajes escenarios encuesta barrios Isla del Sol

En la Figura 2 se muestra el registro fotográfico de los sitios donde previamente se evidencia deficiencia en el sistema de alcantarillado.



Figura 2. Ubicación de zonas de inundación

3.2 Modelación EPA SWMM

3.2.1 Modelación alcantarillado pluvial

Como resultado se obtuvo la modelación tanto de la red de alcantarillado pluvial como sanitario por medio del software EPASWMM, para el caso del alcantarillado pluvial se tendrá una modelación con un periodo de lluvia de 30 minutos, así mismo para el sistema de alcantarillado pluvial se tendrán como base 4 escenarios los cuales pueden ser observados en la Tabla 2.

Tabla 2. Escenarios alcantarillado pluvial barrio Isla del Sol

Escenarios	Qpluvial	Tunjuelo	Válvula
1	3 años	Verano	NO
2	3 años	Tr 2,33 años	NO
3	3 años	Tr 2,33 años	SI
4	10 años	Tr 2,33 años	SI

Con el primer escenario se pretende modelar la condición del sistema de alcantarillado pluvial en época de verano momento en el cual el nivel del río Tunjuelo es inferior a la cota de salida de la red y teniendo la descarga libre del sistema de alcantarillado pluvial, permitiendo identificar que tramos presentan insuficiencia de drenaje o poca capacidad aun en la condición optima. Con el segundo escenario se pretende modelar el sistema de alcantarillado pluvial en un periodo de invierno típico cada año, momento en el cual coincide la precipitación de diseño (Tr 3 años) y un nivel alto en el río Tunjuelo suficiente para ejercer un control hidráulico sobre la descarga del sistema de alcantarillado.

Ante la ausencia de la válvula de reflujo se esperaría que las aguas lluvias se devuelvan, lo cual generaría que la red de alcantarillado pluvial colapse. Con el tercer escenario se pretende modelar una condición del sistema de alcantarillado en la cual se tiene un periodo de invierno típico cada año, momento en el cual coincide la precipitación de diseño (Tr 3 años) y un nivel alto en el río Tunjuelo, en este escenario se cuenta con válvula de reflujo con lo cual se esperaría que las aguas lluvias se devuelvan, lo cual generaría que la red de alcantarillado pluvial se presurice.

Con el cuarto escenario se pretende modelar una condición del sistema de alcantarillado pluvial en donde se tiene un periodo de invierno típico cada año, momento en el cual coincide la precipitación de diseño (Tr 10 años) y un nivel alto en el río Tunjuelo, en este escenario se cuenta con válvula de reflujo con lo cual se esperaría que las aguas lluvias se devuelvan, lo cual generaría que la red de alcantarillado pluvial se presurice para posteriormente poder descargar, con lo cual cabe mencionar que si bien el río Tunjuelo podría durar varios días con un nivel alto después de un evento de lluvia la válvula de reflujo implicaría que el barrio Isla del Sol solo se inunde durante el periodo de lluvia. Para la modelación de los cuatro escenarios anteriormente expuestos del sistema de alcantarillado pluvial, se parte de la explicación anteriormente dada en donde se establecen las especificaciones para cada uno de los pozos, así como para cada uno de los tramos del sistema de alcantarillado pluvial como se observa en la Figura 3.



Figura 2. Numeración de los tramos y pozos de la red de alcantarillado pluvial del barrio Isla del Sol

Para la modelación de los cuatro escenarios se tiene un periodo de lluvia de 30 minutos, por lo cual se hace uso del hietograma que se deriva de la curva IDF anteriormente mencionada. Para los cuatro escenarios

establecidos para la red de alcantarillado pluvial el punto de control en la zona de descarga se determinó a partir de series históricas de nivel máximo del río Tunjuelo durante 35 años según reportes de la estación denominada 20701 puente Bosa-río Tunjuelo, en cuyo caso se determinó el nivel del río para un tiempo de retorno de 2,33 años.

Partiendo de la información anteriormente mostrada se realizó el orden de los niveles máximos del río Tunjuelo de mayor a menor, con lo cual se obtuvo como resultado el periodo de retorno para cada uno de los niveles. Con la información anterior se realizó una interpolación para obtener el nivel del río Tunjuelo para un periodo de retorno de 2.33 años, obteniendo como resultado un nivel de 4.120 metros. Con lo cual es de importancia mencionar que para el periodo de retorno anteriormente mencionado y partiendo de la cota fondo del río (2578.97 msnm) se obtuvo como resultado un nivel de lámina de agua igual a 2583,09 msnm, con lo cual se procede a realizar la modelación por medio del software EPA SWMM para los casos mencionados.

- *Caso 1.* Para el caso 1 se obtuvo como resultado la siguiente modelación, donde se estableció que la mayoría de los tramos que conforman la red de alcantarillado pluvial se encuentran funcionando de manera correcta ya que estos se encuentran funcionando con una capacidad de flujo menor al 50% (Tabla 3 y Figura 3).

Tabla 3. Escenario 1

Escenario	Qpluvial	Tunjuelo	Válvula
1	3 años	Verano	NO

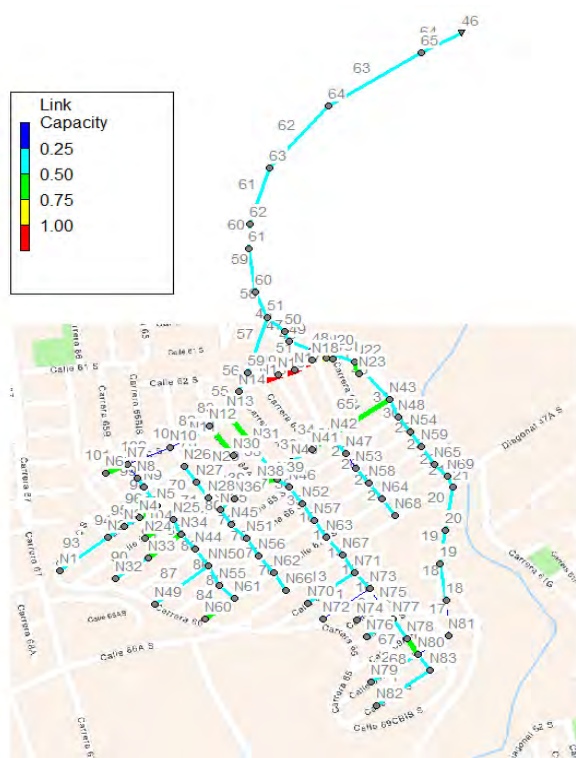


Figura 3. Reflujo red de alcantarillado pluvial para caso 1

Cabe mencionar que para el caso en el cual se tiene un periodo de retorno de 3 años del sistema de alcantarillado pluvial, así como un periodo de retorno del río Tunjuelo en época de verano en donde no se cuenta con un Tide Gate, se puede establecer que en los tramos 49 el cual se encuentra ubicado en la calle 62 C sur con carrera 63 A, tramo 50 el cual se encuentra ubicado en la calle 62 C sur con carrera 63 y el tramo 51 el cual se encuentra ubicado en la calle 62 C sur y la carrera 63 se encuentran con una capacidad mayor o igual al 100%, cabe mencionar que los pozos N16 y N17 que se encuentran en estos tramos presentan rebose, así mismo es de importancia mencionar que se presenta presurización en los pozos denominados N15 y N18, lo cual se puede evidenciar en el perfil de la Figura 4.

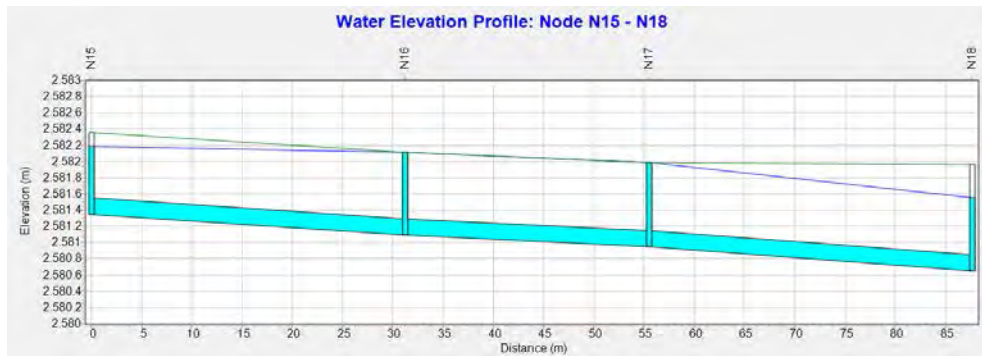


Figura 4. Perfil tuberías de los tramos y pozos desde el N15 al N18 del barrio Isla del Sol para el caso 1

Para el caso de los tramos 44 el cual se encuentra ubicado en la calle 62 C sur con carrera 62 A y el tramo 52 el cual se encuentra ubicado en la calle 62 C sur se evidencia que si bien en estos tramos no se presenta presurización tiene una capacidad flujo igual al 95%; para el caso de los tramos 34 el cual se encuentra ubicado en la calle 64 sur entre las carreras 63 A y 63, y tramo 38 el cual se encuentra ubicado en la calle 64 sur entre las carreras 64 A y 64, el tramo 41 el cual se encuentra ubicado en la carrera 62, así como para el tramo 43 el cual se encuentra ubicado en la calle 62 C sur, el tramo 65 el cual se encuentra ubicado en la calle 64 sur entre las carreras 62 y 63, el tramo 54 el cual se encuentra ubicado en la carrera 64 entre las calles 64 S y calle 62 C sur.

El tramo 72 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 A entre las calles 63 A sur y 64 sur, el tramo 91 ubicado en la calle 64 sur con carrera 65 A, así como para el caso del tramo 92 ubicado en la calle 63 A sur con carrera 65 A, el tramo 96 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur entre las carreras 65 A y 65 B, el tramo 101 el cual se encuentra ubicado sobre la calle 62 C sur entre las carreras 65 A y 65 B, el tramo 84 el cual se encuentra ubicado en la calle 67 A sur y carrera 65 A, el tramo 68 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 69 A y 69 B sur y el tramo 81 ubicado en la carrera 64 A se tiene como resultado que los mismos presentan un flujo entre el 50 al 75% de su capacidad.

- *Caso 2.* Para el caso 2 se obtuvo como resultado la modelación de la Tabla 4 y la Figura 5, donde se estableció que la mayoría de los tramos que conforman la red de alcantarillado pluvial se encuentran funcionando de manera incorrecta ya que estos se encuentran funcionando con una capacidad de flujo mayor o igual al 100%. Estos tramos corresponden a los puntos críticos del sistema de alcantarillado para el escenario 2, ya que en estos tramos se presenta presurización.

Tabla 4. Escenario 2

Escenario	Qpluvial	Tunjuelo	Válvula
2	3 años	Tr 2,33 años	NO



Figura 5. Reflujo red de alcantarillado pluvial caso 2

Observando el perfil de los tramos críticos se puede establecer que, debido a que el diámetro de los tramos, se mantiene constante y no se genera aumento de sección esto provoca que no se produzca mayor capacidad en estos tramos, así mismo se puede observar que si bien no se presenta reboso en estos tramos, si se presenta presurización en los mismos (Figura 6).

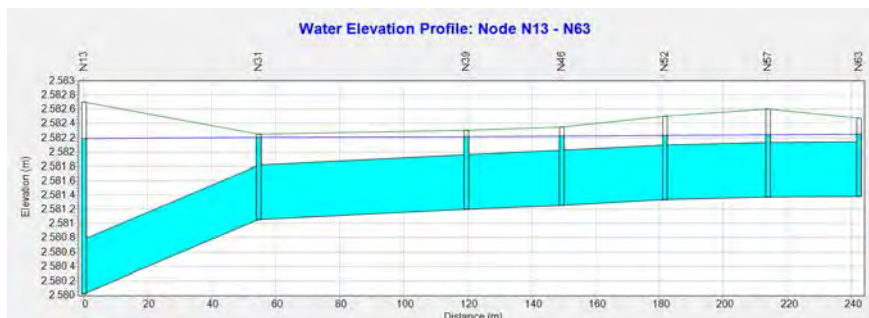


Figura 6. Perfil tuberías de los tramos y pozos desde el N13 al N63 del barrio Isla del Sol para el caso 2

Para el caso del tramo 93 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur, el tramo 87 el cual se encuentra ubicado en la calle 66 sur con carrera 65 A, el tramo 86 el cual se encuentra en la carrera 65 A entre las calles 66 sur y 67 sur, el tramo 85 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 A entre las calles 67 A sur y 67 sur, el tramo 77 el cual se encuentra ubicado en la carrera 35 entre las calles 67 A sur y 67, el tramo 76 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 entre las calles 67 A sur y 67B sur, el tramo 14 el cual se encuentra ubicado en la carrera 64 entre las calles 68 sur y 67 A sur, el tramo 17, el tramo 26 el cual se encuentra ubicado en la carrera 63 entre las calles 66 sur y 67 sur y el tramo 25 el cual se encuentra ubicado en la carrera 63 entre las calles 67 sur y 67 A sur; estos se encuentran a una capacidad mayor al 75% de su capacidad de flujo, pero sin presurización (Figura 7).

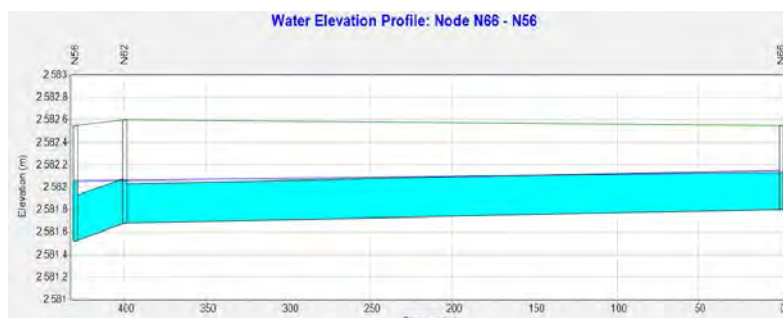


Figura 7. Perfil tuberías de los tramos y pozos desde el N56 al N66 del barrio Isla del Sol para el caso 2

Observando el perfil de los tramos en mención se puede establecer que, si bien no se presenta reboso en estos tramos, si se presenta presurización en los mismos. para el caso de los tramos 13 el cual se encuentra ubicado en la calle 68 sur, el tramo 12 el cual se encuentra ubicado en la carrera 64 entre las calles 68 sur y 68 A sur, el tramo 69 el cual se encuentra ubicado sobre la 69 B sur, el tramo 68 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 69 A y 69 B sur y el tramo 24 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 63 entre las calles 67 A sur y 67 B sur; se tiene como resultado que los mismos presentan un flujo entre el 50 al 75% de su capacidad lo cual puede ser observado en la Figura 8.

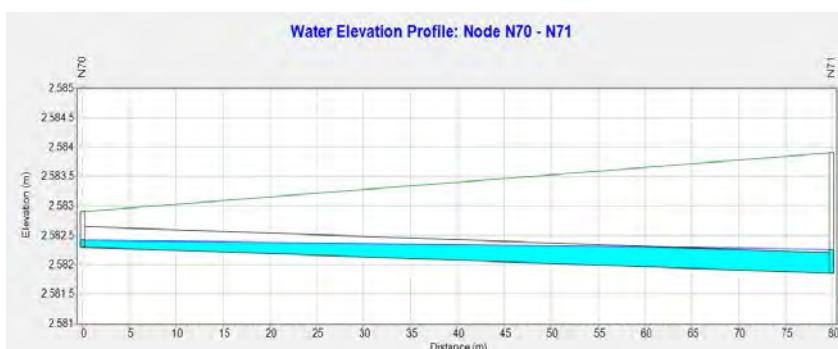


Figura 8. Perfil tuberías de los tramos y pozos desde el N79 al N71 del barrio Isla del Sol para el caso 2

Para el caso de los tramos 11 el cual se encuentra ubicado sobre la calle 68 A sur, el tramo 10 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 68 B sur y 68 A sur, el tramo 8 el cual se encuentra ubicado sobre la calle 69 sur, el tramo 67 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 69 sur y 69 A, el tramo 2 el cual se encuentra ubicado sobre la calle 69 B sur, el tramo 5 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 69 B sur y 69 C sur y el tramo 1 el cual se encuentra ubicado sobre la calle 69 C sur; se tiene como resultado que los mismos presentan un flujo entre el 25 al 50% de su capacidad.

- **Caso 3.** Para el caso 3 se obtuvo como resultado la modelación de la Tabla 5 y las Figuras 9 y 10, en donde se puede establecer que una gran cantidad de los tramos que conforman la red de alcantarillado pluvial se encuentran funcionando de manera incorrecta ya que estos se encuentran con una capacidad de flujo mayor al 100%, con lo cual cabe mencionar que de acuerdo a los perfiles arrojados por el software se tiene como resultado que en los pozos N17, N18, N22, N43 se presenta rebose de los mismos, con lo cual cabe mencionar que los demás pozos de los tramos que se encuentran en color rojo si bien no se presenta rebose si se presenta presurización de los mismos.

Tabla 5. Escenario 3

Escenario	Qpluvial	Tunjuelo	Válvula
3	3 años	Tr 2,33 años	SI



Figura 9. Reflujo red de alcantarillado pluvial caso 3

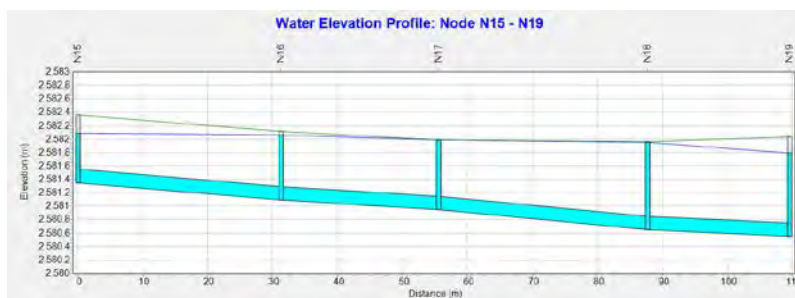


Figura 10. Perfil tuberías de los tramos y pozos desde el N15 al N19 para el caso 3

Para el caso del tramo 95 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur entre las carreras carrera 66 y carrera 65 B este se encuentra al 77% de su capacidad de flujo, el tramo 96 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur entre las carreras 65 A y 65 B se encuentra con una capacidad de flujo al 94%, para el caso del tramo 92 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 A sur con carrera 65 A se encuentra con una capacidad de flujo al 78%, el tramo 91 el cual se encuentra ubicado en la calle 64 sur con carrera 65

A se encuentra con una capacidad de flujo al 92%, Para el caso del tramo 100 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 A entre las calles 62 C sur y 62 D sur este se encuentra al 100% de su capacidad de flujo, Para el caso de los tramos 99 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 A con calle 62 D sur , el tramo 98 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 A entre las calles 62 D sur y 63 sur, el tramo 97 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 A entre las calles 63 sur y 63 A sur estos se encuentran al 100% de su capacidad de flujo.

Para el caso del tramo 88 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 A entre las calles 65 S y 66 S este se encuentra al 78% de su capacidad de flujo, el tramo 79 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 entre las calles 65 sur y 66 sur este se encuentra al 98% de su capacidad de flujo, el tramo 78 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 entre las calles 66 sur y 67 sur este se encuentra al 90% de su capacidad de flujo, el tramo 81 el cual se encuentra ubicado en la carrera 64 A este se encuentra al 99% de su capacidad de flujo.

Para el caso del tramo 54 el cual se encuentra ubicado en la carrera 64 entre las calles 64 S y calle 62 C sur este se encuentra al 100% de su capacidad de flujo, el tramo 53 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur este se encuentra al 93% de su capacidad de flujo, el tramo 37 el cual se encuentra ubicado en la carrera 64 entre las calles 65 sur y 64 sur este se encuentra al 80% de su capacidad de flujo, el tramo 102 el cual se encuentra ubicado en la calle 62 C sur entre las carreras 65 y 65 A este se encuentra al 94% de su capacidad de flujo, el tramo 26 el cual se encuentra ubicado en la carrera 63 entre las calles 66 sur y 67 sur se encuentran al 98% de su capacidad de flujo, en cuanto al tramo 25 se refiere el cual se encuentra ubicado en la carrera 63 entre las calles 67 sur y 67 A sur se encuentra al 81%, mientras que para el tramo 17 este se encuentra al 85% de su capacidad de flujo (Figura 11).



Figura 11. Condiciones críticas de la red de alcantarillado pluvial del barrio Isla del Sol para el caso 3

Para el caso de los tramos 90 el cual se encuentra sobre la calle 64 sur con carrera 65 A, el tramo 87 el cual se encuentra ubicado en la calle 66 sur con carrera 65 A, el tramo 77 el cual se encuentra ubicado en la carrera 35 entre las calles 67 A sur y 67, el tramo 36 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 65 sur y 66 sur, el tramo 35 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 66 sur y 67 sur, el tramo 16 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 67 sur y 67 A sur, el tramo 15 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 67 A sur y 67 B sur, y el tramo 24 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 63 entre las calles 67 A sur y 67 B sur estos se encuentran con una capacidad de flujo menor al 75%, mientras que los tramos restantes se encuentran funcionando de manera correcta ya que su capacidad se encuentra en un rango menor al 50% de la misma.

- **Caso 4.** Para el caso 4 se obtuvo como resultado la modelación de la Tabla 6 y la Figura 12, en donde se puede establecer que la mayoría de los tramos que conforman la red de alcantarillado pluvial se encuentran funcionando de manera incorrecta ya que estos se encuentran con una capacidad de flujo mayor al 100%.

Tabla 6. Escenario 4

Escenario	Qpluvial	Tunjuelo	Válvula
4	10 años	Tr 2,33 años	SI

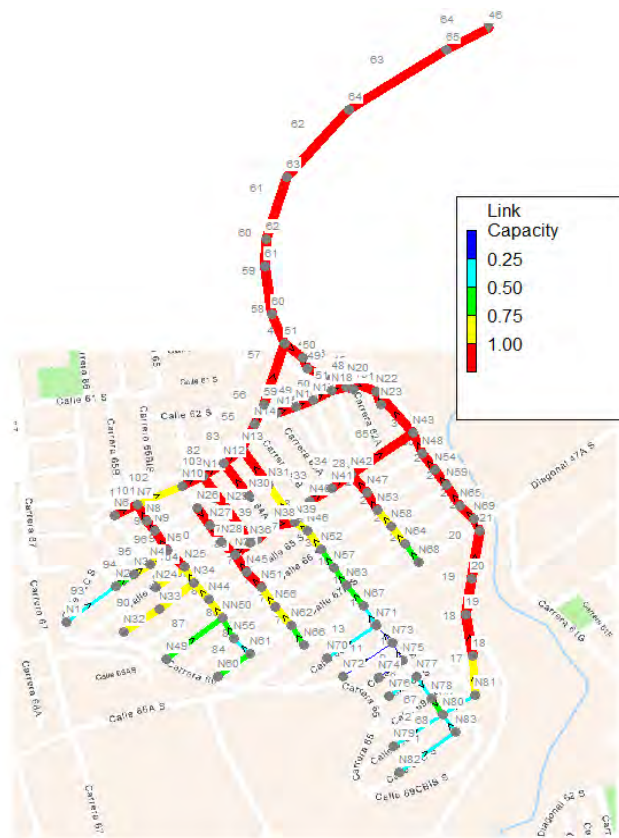


Figura 12. Reflujo red de alcantarillado pluvial para el caso 4

Con lo expuesto se puede establecer que como resultado de un periodo de retorno de 10 años del sistema de alcantarillado pluvial, así como un periodo de retorno del río Tunjuelo igual a 2.33 años en donde se cuenta con un Tide Gate se puede establecer que los tramos 94 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur entre las carreras 66 A y 66, tramo 87 ubicado en la calle 66 sur con carrera 65 A, el tramo 86 ubicado en la carrera 65 A entre las calles 66 sur y 67 sur, tramo 84 el cual se encuentra ubicado en la calle 67 A sur y carrera 65 A, el tramo 76 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 entre las calles 67 A sur y 67B sur, el tramo 68 ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 69 A sur y 69 B sur, el tramo 35 ubicado en la carrera 64 con calles 66 sur y 67 sur, el tramo 16 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 67 sur y 67 A sur, el tramo 15 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 67 A sur y 67 B sur, el tramo 24 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 63 entre las calles 67 A sur y 67 B sur, se encuentra en un rango de capacidad de flujo de los mismos del 50% al 75%.

Para el caso del tramo 95 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur entre las carreras carrera 66 y carrera 65 B, este se encuentra con una capacidad de flujo del 86%, para el caso del tramo 96 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur entre las carreras 65 A y 65 B este se encuentra con una capacidad de flujo del 97%, así mismo cabe mencionar que para el tramo 92 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 A sur con carrera 65 A su capacidad de flujo se encuentra al 84%, para el tramo 90 el cual se encuentra ubicado sobre la calle 64 sur con carrera 65 A el mismo se encuentra con una capacidad de flujo del 80%.

Para el caso del tramo 91 el cual se encuentra ubicado en la calle 64 sur con carrera 65 A, este se encuentra con una capacidad de flujo del 98%, el tramo 102 el cual se encuentra ubicado en la calle 62 C sur entre las carreras 65 y 65 A este se encuentra con una capacidad de flujo del 95%, así mismo cabe mencionar que para el caso del tramo 104 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 65 A entre las calles 63 A sur y 64 sur su capacidad de flujo se encuentra al 99%.

Para el tramo 89 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 65 A entre las calles 64 sur y 65 sur el mismo se encuentra con una capacidad de flujo del 94%, el tramo 88 el cual se encuentra ubicado en la carrera 65 A entre las calles 65 S y 66 S, este se encuentra con una capacidad de flujo del 85%, para el

caso del tramo 78 el cual se encuentra ubicado en a carrera 65 entre las calles 66 sur y 67 sur este se encuentra con una capacidad de flujo del 96%, así mismo cabe mencionar que para el caso del tramo 77 el cual se encuentra ubicado en la carrera 35 entre las calles 67 A sur y 67 su capacidad de flujo se encuentra al 81%, el tramo 53 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur el mismo se encuentra con una capacidad de flujo del 97%.

Para el caso del tramo 37 el cual se encuentra ubicado en la carrera 64 entre las calles 65 sur y 64 sur, este se encuentra con una capacidad de flujo del 87%, para el caso del tramo 36 el cual se encuentra ubicado sobre la carrera 64 entre las calles 65 sur y 66 sur este se encuentra con una capacidad de flujo del 78%, así mismo cabe mencionar que el tramo 26 el cual se encuentra ubicado en la carrera 63 entre las calles 66 sur y 67 sur su capacidad de flujo se encuentra al 100%, para el tramo 25 el cual se encuentra ubicado en la carrera 63 entre las calles 67 sur y 67 A sur el mismo se encuentra con una capacidad de flujo del 88%, el tramo 17 en el cual se encuentra con una capacidad de flujo del 86%.

Cabe mencionar que con respecto a la modelación se obtuvo que los puntos críticos del sistema correspondiente a los tramos que exceden 100% de su capacidad de flujo, se establece que en los pozos N40, N16, N17, N18, N22 y N17 se presenta rebose de los mismos como se observa en la Figura 13.

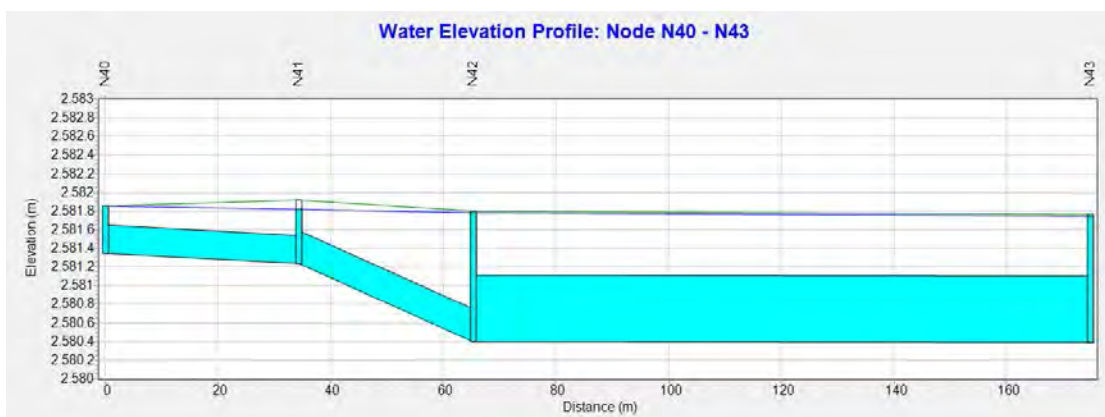


Figura 13. Perfil de los tramos y pozos desde el N40 al N43 del barrio Isla del Sol para el caso 4

Con base en los casos descritos para el alcantarillado pluvial se ilustra la Tabla 7, en la cual se encuentra el rango de capacidades el cual es arrojado por el software EPA SWMM, en donde para cada uno de los casos en mención se muestra la cantidad de tramos para cada uno de los rangos de capacidad, así como el porcentaje de los tramos correspondiente para cada uno de los rangos de capacidad.

Tabla 7. Resultado escenarios

CUADRO RESUMEN								
CAPACIDAD	CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	CANTIDAD TRAMOS	% TRAMOS/POZOS	CANTIDAD TRAMOS	% TRAMOS/POZOS	CANTIDAD TRAMOS	% TRAMOS/POZOS	CANTIDAD TRAMOS	% TRAMOS/POZOS
POZOS CON REBOSE	2	2%	13	13%	2	2%	5	5%
0-25%	9	9%	1	1%	6	6%	4	4%
25-50%	70	71%	7	7%	13	13%	10	10%
50-75	14	14%	5	5%	8	8%	10	10%
75-100%	2	2%	10	10%	21	21%	17	17%
>100	3	3%	75	77%	50	51%	57	58%
TOTAL TRAMOS	98		98		98		98	

Con lo anterior se puede establecer que para el caso 3 y 4 en los cuales se cuenta con válvula antirreflujo se puede evidenciar que esta provoca que allá una disminución de los tramos presurizados ya que de acuerdo a lo evidenciado en el caso 2 en el cual no se cuenta con válvula antirreflujo se tiene un porcentaje igual al 77% de tramos presurizados, mientras que para el caso 3 se tiene un porcentaje igual al 51% de tramos presurizados y para el caso 4 se tiene un total del 58% de los tramos presurizados. Así mismo cabe mencionar que para el caso 1 en el cual se tiene que para este se tiene un periodo de retorno

de 3 años del sistema de alcantarillado pluvial, así como un periodo de retorno del río Tunjuelo en época de verano se establece que se tiene un 3% de tramos presurizados.

Se puede establecer que el caso en el cual funciona mejor el sistema de alcantarillado pluvial corresponde al caso 1 ya que como se mencionó anteriormente este escenario corresponde a un periodo de verano, ya que en este el 80% de los tramos funcionan de manera correcta con un porcentaje de capacidad de fujo de los mismos en un rango inferior al 50% de su capacidad; seguido por el caso 3 en donde se tiene un total de 19% de los tramos con una capacidad de flujo menor al 50%, para el caso 4 se tiene un total del 14% de los tramos con una capacidad de flujo menor al 50%, por último se encuentra el caso 2 en donde se tiene un total del 8% de los tramos con una capacidad de flujo menor al 50%, con lo cual se puede establecer que es mejor el escenario en época de verano seguido por el escenario en el cual se cuenta con válvula antirreflujo.

Para el caso 3 este es en el cual se encuentra una mayor cantidad de pozos en rebose, para este caso se obtuvo un total de 13 pozos con rebose, lo anterior puede deberse a que la válvula de reflujo ocasiona que el sistema se presurice más, para así poder descargar, lo cual evita que el barrio Isla del Sol se inunde con agua contaminada (aguas residuales)

3.2.2 Modelación alcantarillado sanitario

Para el caso del sistema de alcantarillado sanitario se obtuvo la siguiente modelación, partiendo de la explicación anteriormente dada en donde se establece las especificaciones para cada uno de los pozos, así como para cada uno de los tramos del sistema de alcantarillado sanitario, así mismo para los caudales correspondientes a cada uno de los tramos, lo cual se observa en la Tabla 8..

Tabla 8. Dotación

Dot (m ³ /Sus-mes)	25,262
Dot (Lt/Sus-día)	842,0667

Como se explicó anteriormente, con el desarrollo de la encuesta realizada se obtuvo una dotación correspondiente a 842,066 Lt/Sus-dia. Como se mencionó anteriormente en el desarrollo del presente documento el alcantarillado sanitario fue dividido en manzanas en donde para cada una de las manzanas que conforman este sistema de alcantarillado sanitario se determinó el área total correspondiente a cada una de estas, para ilustrar lo anteriormente mencionado se expone el caso correspondiente a la manzana 1, en donde para esta se obtuvo un área total igual a 0,21 Ha.

Así mismo para esta manzana se procedió a determinar variables como lo son los suscriptores totales para esta manzana que para el caso en mención se obtuvo un total de 28 suscriptores, de igual manera se procedió a calcular el caudal de aguas residuales basándose en las ecuaciones expuestas con anterioridad en el presente documento, para lo anterior se obtuvo un resultado igual a 0,232 Lps (Tabla 9).

Tabla 9. Caudal Alcantarillado Sanitario

Usuarios	28	
QDAR(Resid) (Lps)	0,232	
Qcomercial (Lps)	0,000	
Qindustrial (Lps)	0,000	
Qinstitucional (Lps)	0,000	
Qmd (Lps)	0,232	
F	5,004	3
QMH.AR (Lps)	0,696	
Q CE (Lps)	0,042	
Q inf (Lps)	0,021	
QD (Lps)	0,759	1,500

De igual manera se realizó el cálculo del caudal comercial para cada una de las manzanas que conforman el sistema de alcantarillado, para el caso de la manzana 1, en esta no se encontraban actividades

comerciales por lo cual se obtuvo un caudal comercial igual a cero, así mismo ocurre para el caso del caudal industrial y el caudal institucional, por lo cual a los mismos se les asigno un valor igual a cero, con lo cual con los resultados anteriormente mencionados se obtuvo un caudal medio igual a 0,232 Lps. Para el caso del cálculo del factor de mayoración anteriormente expuesto se hace uso de la ecuación de flores, en donde de acuerdo con el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico siguiendo los lineamientos de Resolución 0330 de 2017.

Se establece que para una población menor a 20.000 habitantes el factor de mayoración debe ser menor o igual a 3, para la manzana 1 se obtuvo un valor de 5.004, pero con base en la fundamentación anteriormente dada, se le asigna un valor de 3. De acuerdo con la ecuación anteriormente expuesta en el presente documento para el cálculo del caudal máximo horario correspondiente a la manzana 1 se obtuvo un valor de 0,696 Lps, para el caso del caudal de conexiones erradas se obtuvo un valor de 0,042 Lps, para el caso del caudal por infiltración se obtuvo un valor correspondiente a 0,021 Lps, para el caso del cálculo del caudal de diseño se toma como base lo expuesto en el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico siguiendo los lineamientos de la Resolución 0330 de 2017 (RAS).

Se establece que cuando en un tramo el cálculo del caudal de diseño sea inferior a 1,5 L/s se debe adoptar este valor para el caudal de diseño, por lo anterior cabe mencionar que para la manzana 1 se obtuvo un valor de 0,759 Lps por lo cual con lo anteriormente mencionado se asigna un valor de 1.5 L/s para el caudal de diseño correspondiente a la manzana 1.

Para el caso de la manzana 1 la cual se encuentra conformada por el tramo 53 el cual se encuentra constituido por los pozos denominados 10 y 11 (Tabla 10); y por el tramo 52 el cual se encuentra conformado por los pozos denominados 6 y 11, se establece el valor del caudal de diseño para cada uno de estos tramos como se observa a continuación, en donde para el caso del tramo 53 se obtuvo un caudal de diseño igual a 0,750 Lps y para el tramo 52 se obtuvo un caudal de diseño igual a 0,750.

Tabla 11. Caudal de Diseño

Tramo 10---11	
QD (Lps)	0,750
Tramo 6---11	
QD (Lps)	0,750

Para la modelación de la red de alcantarillado sanitario en el software EPA SWW se establece la denominación de los pozos y tramos mostrados en la Figura 14.

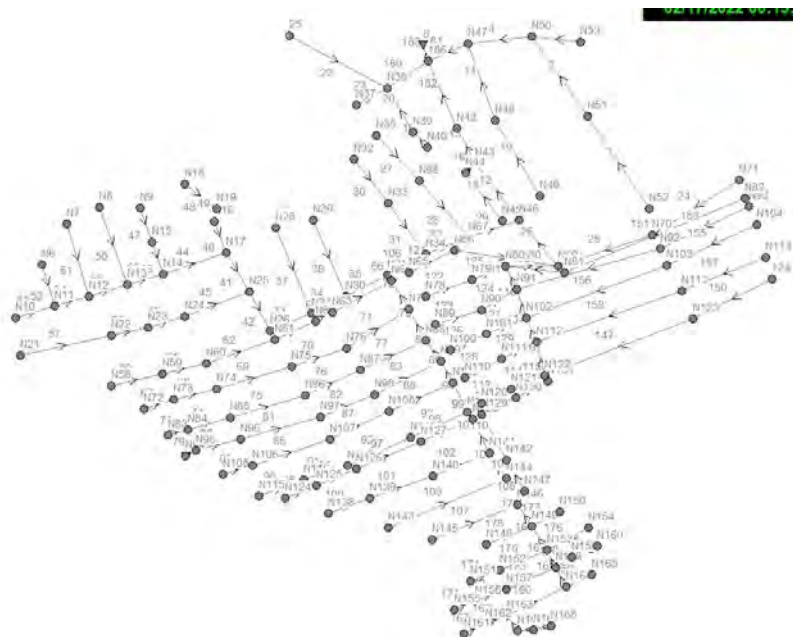


Figura 14. Modelación de la red de alcantarillado sanitario del barrio Isla del Sol

Una vez realizado el esquema de la red de alcantarillado sanitario, se establece la capacidad de este con el fin de establecer el funcionamiento del mismo con lo cual se obtiene como resultado que dicho sistema de alcantarillado se encuentra funcionando de manera correcta ya que como se evidencia en la Figura 15, los tramos de la red se encuentran en color azul oscuro y color azul claro lo cual corresponde a tramos con un flujo inferior al 50% de su capacidad.

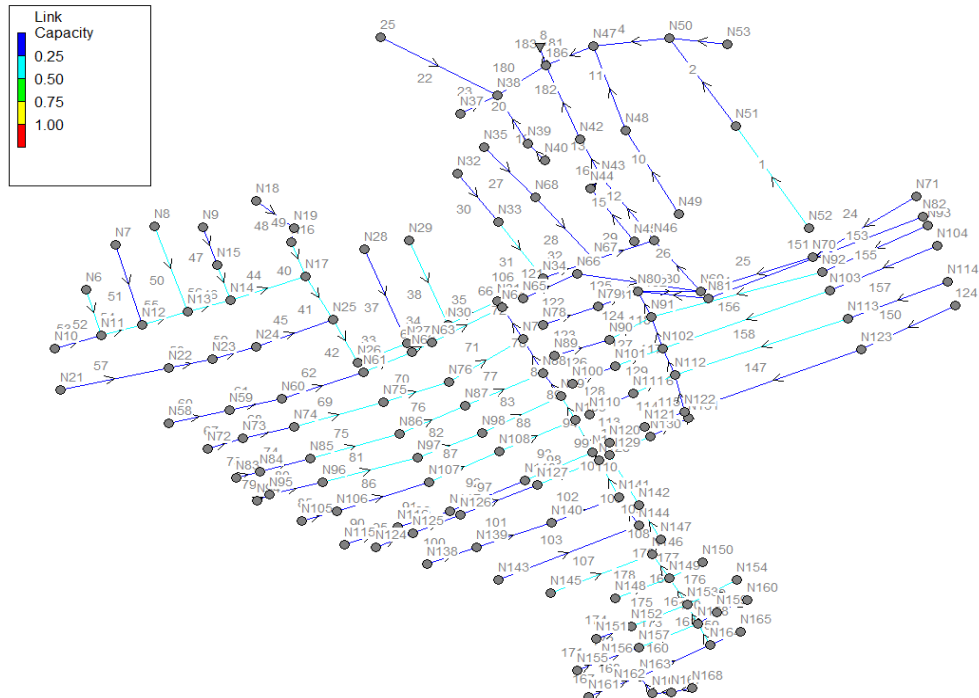


Figura 15. Capacidad de los tramos de la red de alcantarillado sanitario del barrio Isla del Sol

Con lo cual se obtuvo como resultado un total de 53 tramos en los cuales se presenta un flujo entre el 25 al 50% de su capacidad lo cual se puede observar en el siguiente perfil el cual corresponde al tramo 129 el cual se encuentra ubicado en la calle 67 A sur entre las carreras 65 C y 64 y tramo 158 el cual se encuentra ubicado en la calle 67 A sur entre las carreras 63 y 64. Se obtuvo un total de 96 tramos en los cuales se presenta un flujo inferior al 25% de su capacidad, lo cual puede ser evidenciado en el tramo 53 el cual se encuentra ubicado en la calle 63 sur.

Los caudales calculados corresponden a los caudales digitados en el modelo que en este caso es la variable INFLOW, el modelo permite verificar que la sumatoria de caudales de diseño asignados en cada nodo sea igual al de descole de la red. La sumatoria de caudales sanitarios corresponde a 81,60 LPS, se procede a verificar en el modelo de las Figuras 16 a 18.

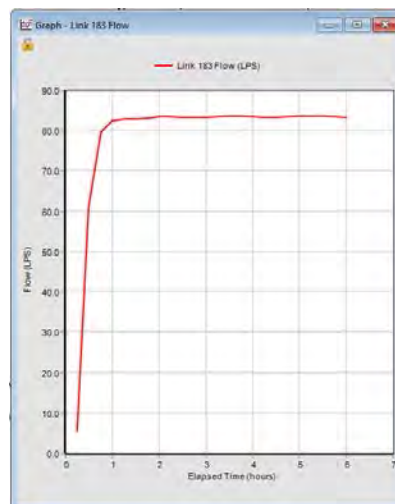


Figura 16. Tramo 183 descole de red sanitaria, caudal en LPS de descole en la red sanitaria del barrio Isla del Sol

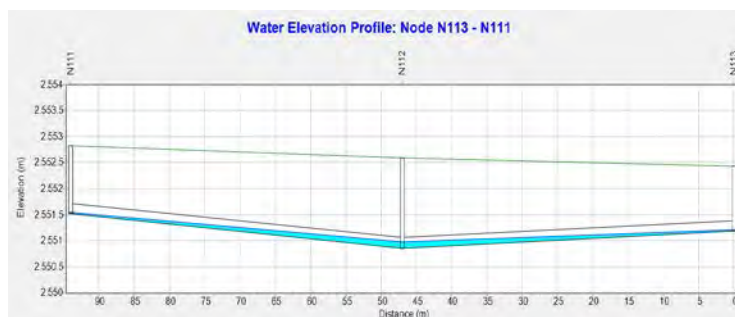


Figura 17. Perfil de los tramos y pozos desde el N111 al N113 del barrio Isla del Sol para el alcantarillado sanitario

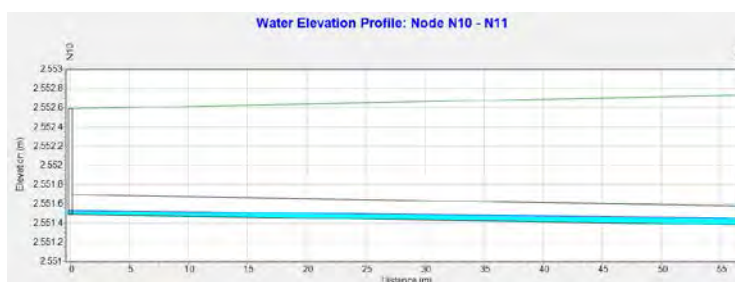


Figura 18. Perfil de los tramos y pozos desde el N10 al N11 del barrio Isla del Sol para el alcantarillado sanitario

4. CONCLUSIONES

El 27% de residentes se inundan al menos una vez al año, siendo la zona más crítica entre las calles 65 sur entre carrera 62 y carrera 63, calle 64 sur con carrera 62A, calle 64 sur con carrera 62, calle 65 sur con carrera 62 y calle 66 sur con carrera 62, debido a su proximidad al Jarillón y un menor nivel respecto al río Tunjuelo. La inundación presentada en el barrio Isla de Sol es ocasionada ya que el nivel del río Tunjuelo (cota 2583,09 msnm) impide la descarga de las aguas lluvias hacia el río, por cuanto el nivel de descarga se encuentra por debajo del nivel de la lámina de agua y varias calles quedan por debajo de esta cota, muestra de ello, en el primer escenario tan solo el 2% de los pozos del alcantarillado pluvial generan rebose.

La válvula antirreflujo aporta significativamente a mitigar el fenómeno de reflujos, pasando del 13% de pozos con rebose y 77% de tuberías presurizadas, a solo 2% de pozos con rebose y 51% de tramos presurizados. La localización del barrio Isla del Sol en un meandro abandonado del río Tunjuelo y la descarga del alcantarillado pluvial por debajo de la cota del río Tunjuelo asociada a una creciente anual (Tr 2,33 años), ocasiona una falla estructural del alcantarillado pluvial que exige la búsqueda de medidas de mitigación, como puede ser un pondaje con bombeo mediante tornillos de Arquímedes hacia el río Tunjuelo.

De acuerdo a la encuesta realizada a los residentes del barrio Isla del Sol se pueden establecer las zonas en las cuales según la comunidad de este barrio se presentan inundaciones lo cual se pudo constatar con la modelación realizada en el programa EPASWMM, así mismo de acuerdo con esta encuesta se pudo establecer las posibles causas de inundación en el barrio Isla del Sol, entre las cuales se encuentra rebose del sistema de alcantarillado así como inundación debido a los aumentos del nivel del río Tunjuelo.

La modelación de las redes de alcantarillado sanitario y pluvial por medio del software EPASWMM permitió establecer las zonas en las cuales se presentan fallas en los sistemas de alcantarillado, permitiendo así establecer los pozos en los cuales se presenta presurización sin generarse rebose, así como los pozos en los cuales, si se genera rebose, permitiendo de esta manera identificar los puntos críticos del sistema. La modelación de las redes de alcantarillado en el software EPASWMM permitió establecer que en cuanto al sistema de alcantarillado sanitario se refiere se puede determinar que este se encuentra funcionando de manera satisfactoria ya que se puede establecer que la capacidad de flujo en los tramos de la red se encuentra en rangos óptimos para el correcto funcionamiento del sistema de alcantarillado sanitario.

La modelación de la red de alcantarillado pluvial por medio del software EPASWMM permitió establecer que en un periodo de lluvia de 30 minutos en varios de los tramos de la red se genera presurización de los pozos de la misma, de igual manera cabe mencionar que en varios de los pozos que conforman la red de

alcantarillado pluvial se presenta rebose lo cual genera una gran insuficiencia en el funcionamiento de la red de alcantarillado, generando así inundación por encharcamiento. Se pudo observar que los problemas presentados en la red de alcantarillado podrían ser solucionados si se mejorara el dimensionamiento de la red de alcantarillado, lo cual se puede lograr aumentando el diámetro de algunos de los tramos que conforman la red.

REFERENCIAS

- [1] IDIGER. (2018). Proyecto actualización componente de gestión del riesgo para la revisión ordinaria y actualización del plan de ordenamiento territorial. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Bogotá.
- [2] Caviedes L. et al. (2020). Análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación en el sector canteras de la cuenca del río Tunjuelo. Trabajo de grado. Universidad Santo Tomás.

Evaluación de la vulnerabilidad física de la infraestructura rural por el desbordamiento de afluentes de agua

Abdón Felipe Cely Negret¹

Alejandro Franco Rojas²

Universidad de la Salle

Colombia

Tanto en las metas 1.5, 11.b y 13.1 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, como en la meta E del Marco de Sendái, se establece que los países avancen en el desarrollo de estrategias de reducción del riesgo de desastres, superando la fase de identificación de los fenómenos amenazantes para avanzar en la implementación, la identificación de recursos técnicos y financieros, así como en la asignación de responsabilidades, tanto a actores gubernamentales como no gubernamentales, entendiéndose que la gestión del riesgo es responsabilidad de toda la sociedad. Conocer la vulnerabilidad de la infraestructura rural ante amenazas naturales, como las inundaciones, permite la anticipación y una mejor preparación, lo cual redundará en reducción de pérdidas de vidas, bienes y servicios. Sin embargo, la experiencia muestra un alto rezago en la gestión y reducción del riesgo a nivel rural y, de hecho, no se cuenta con herramientas para la valoración de la vulnerabilidad de la infraestructura rural. La planificación para la reducción del riesgo de desastres busca disminuir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad de recuperación, lo cual exige la asignación de recursos humanos, técnicos y financieros en las distintas etapas, como conocimiento, reducción del riesgo y atención de emergencias. Para avanzar en la valoración de la vulnerabilidad en este trabajo se desarrollaron tres fases: 1) caracterización de los elementos expuesto, 2) diseño de rúbricas adaptadas a las condiciones propias de estos elementos expuesto, y 3) análisis de vulnerabilidad física. Se toma como estudio de caso un sector de la quebrada La Laja, en el municipio de Icononzo, Colombia. Se logró el diseño de rúbricas para la valoración cualitativa de la vulnerabilidad física de infraestructura en un contexto rural, se identificó la infraestructura expuesta a inundaciones y producto de su aplicación, se logró determinar las condiciones que mayor vulnerabilidad generan y la priorización de elementos expuestos a una vulnerabilidad entre media y alta, debido a los aspectos constructivos, poco mantenimiento y localización dentro de la zona de ronda.

¹ Ingeniero Civil.

Contacto: Acely97@unisalle.edu.co

² Ingeniero Civil y Magíster en Recursos hidráulicos.

Contacto: Afrancor@unisalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Un componente esencial en la ocupación y planeación del territorio corresponde a la gestión del riesgo, razón por la cual la Ley 1523 de 2012 indica que es deber de las autoridades proteger a la población en su vida e integridad física y mental, en sus bienes y en sus derechos, frente a posibles desastres o fenómenos peligrosos [6]. En este sentido, el Decreto 1807 de 2014 establece la obligatoriedad de incluir la gestión del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial, tanto en suelo urbano como rural, considerando aquellas áreas urbanizadas, edificadas, o con elementos del sistema vial, equipamientos e infraestructura de servicios públicos. Sin embargo, según datos del Ministerio de Vivienda, el 80% de los POT del país se encuentran desactualizados en estas materias [7].

Adicionalmente, la zonificación y delimitación de áreas en condición de amenaza y riesgo por eventos naturales suele concentrarse en el suelo urbano, siendo escasos los estudios desarrollados a nivel rural. Esta situación limita la posibilidad de tomar medidas de mitigación y reducción del riesgo, y afecta el desarrollo económico y la seguridad de quienes residen en suelo rural [3].

La vulnerabilidad de la población y los elementos expuestos constituye un componente principal en la gestión del riesgo, en cuanto corresponde a la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos. Es ello, que los esfuerzos deben enfocarse tanto en reducir la exposición a los eventos amenazantes, como en aumentar la capacidad de recuperación y resiliencia de la población y los elementos expuestos [1].

La infraestructura rural se caracteriza por su dispersión espacial, adicionalmente su ejecución suele realizarse con criterios de diseño menos exigentes y un mantenimiento preventivo esporádico, dando lugar a su deterioro progresivo y por tanto, a pérdida de funcionalidad. Reconociendo estas particularidades de la infraestructura rural, resulta pertinente desarrollar una metodología tendiente a evaluar su vulnerabilidad de acuerdo a las características propias de cada elemento expuesto.

Muestra de esta condición, el municipio de Icononzo, aunque sobresale por su potencial turístico en zona rural, particularmente por la existencia de balnearios en el sector de la quebrada La Laja (Figura 1), históricamente se reconocen los efectos de fuertes crecientes que provocan daños estructurales a viviendas e infraestructura, incluyendo la vía que conecta a los municipios de Pandí en el departamento de Cundinamarca con el municipio de Icononzo en el departamento del Tolima. Para evaluar la vulnerabilidad de su infraestructura rural, se seleccionó un sector de la quebrada La Laja con longitud de 1,3 km, en el cual se identifican siete viviendas residenciales, tres puentes vehiculares, una vía paralela a la quebrada e infraestructura de servicios públicos como son postes de luz [2].

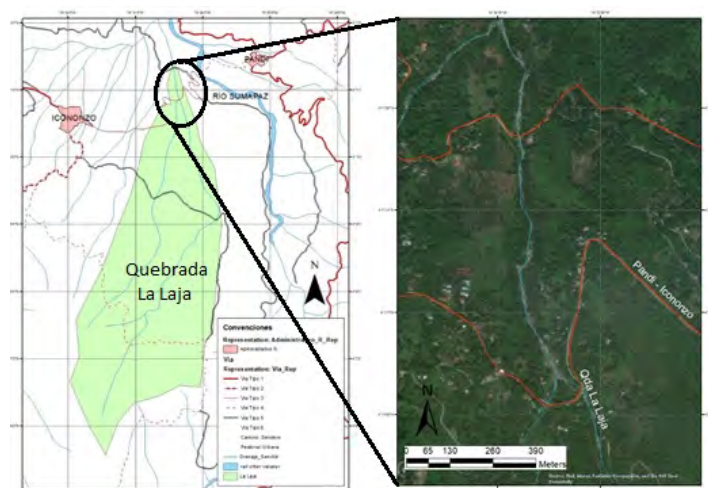


Figura 1. Localización de la quebrada La Laja entre los municipios de Icononzo y Pandí, sobre la cordillera oriental

La quebrada La Laja es un afluente del río Sumapaz y se caracteriza por tener un lecho rocoso, con presencia de cantos rodados de tamaño mayor a 1,0m y vegetación arbustiva en sus riveras (Figura 2). Aunque en periodo de estiaje su cauce no excede 1,0m de ancho, durante el periodo invernal el flujo suele superar los 30m de ancho, con altas velocidades.



Figura 2. Cauce de la quebrada La Laja conformado por rocas labradas por la erosión del agua y rocas de tamaño superior a 1,0m transportadas por flujos torrenciales

2. MÉTODO

2.1 Caracterización de elementos expuestos

Inicialmente se realizaron visitas de campo para realizar el reconocimiento de zona ronda de la quebrada y las áreas en condición de amenaza por desbordamiento de la quebrada, particularmente de las viviendas. En cada caso se realizó registro fotográfico, georreferenciación y descripción de materiales, sistema estructural y posibles patologías o fallas en su construcción y estado de conservación (Figura 3).



Figura 3. Localización de viviendas residenciales en las márgenes de la quebrada La Laja

De igual forma se identificó, georreferenció y caracterizó la estructura física que se puede ver afectada por las crecientes de la quebrada La Laja (Figura 4). Para cada puente, vía y poste de energía eléctrica, se realizó registro fotográfico y mediante fichas de campo se determinaron detalles como materiales de construcción, dimensiones, estado de calzada y condiciones constructivas.



Figura 4. Localización de infraestructura en el sector de la quebrada La Laja

2.2 Diseño de rubricas para evaluación de vulnerabilidad

Acorde con la tipología de viviendas e infraestructura identificada, se diseñaron rubricas de calificación de la vulnerabilidad, siguiendo los lineamientos de la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa y la Guía metodológica para la elaboración de planes departamentales para la gestión del riesgo de UNGRD. Estas rubricas permiten a partir de una valoración cualitativa (Tabla 1) reclasificar cada factor de vulnerabilidad en Baja (1), Media (2) o Alta (3), según corresponda [4-5]. Seguidamente, se suma la calificación de cada factor de vulnerabilidad y se establece una valoración cualitativa de vulnerabilidad física de cada elemento expuesto.

Tabla 1. Rubrica de vulnerabilidad física ante inundaciones de viviendas rurales

Variable	Valor de la vulnerabilidad		
	Baja (1)	Media (2)	Alta (3)
Antigüedad	Menos de 5 años	Entre 6 y 20 años	Mayor de 20 años
Materiales de construcción y estado de conservación	Estructura con materiales de muy buena calidad, adecuada técnica constructiva y buen estado de conservación	Estructura de madera, concreto, adobe bloque o acero sin adecuada técnica constructiva y con un estado de deterioro moderado	Estructuras de adobe, madera u otros materiales, en estado precario de conservación
Cumplimiento de la norma NSR10	Toda la estructura cuenta con un sistema estructural homogéneo, sin grietas que evidencien una falla estructural	Sistema estructural homogéneo, pero con discontinuidad en los elementos y presencia de grietas que evidencian fallas estructurales	No se observan elementos estructurales como vigas y columnas, se combinan sistemas estructurales y se observan grietas que evidencian fallas estructurales
Características geológicas y tipo de suelo	Zonas que no presentan problemas de estabilidad, con buena cobertura vegetal	Zonas con indicios de inestabilidad y con poca cobertura vegetal	Zonas con problemas de estabilidad evidentes, rellenos antrópicos y sin cobertura vegetal
Localización de las viviendas con respecto a zonas de retiro a fuentes de agua y zonas de riesgo identificadas	A más de 70 metros del cauce	De 30 a 70 metros del cauce	Dentro de la zona de ronda (menos de 30 metros)

Para las viviendas encontradas en la zona se diseñó la ficha de vulnerabilidad mostrada en la Tabla 1, en la cual se consideran como variables: la antigüedad de la edificación, el material de construcción y estado de conservación, el cumplimiento de la norma NSR-10, las características geológicas y tipo de suelo, así como la localización de la vivienda con respecto a la ronda de influencia de la quebrada. Teniendo en cuenta que se utilizaron cinco variables, la sumatoria tendrá un valor mínimo de 5 y máximo de 15, que se reclasifica en vulnerabilidad Baja para un resultado entre 5-7, vulnerabilidad Media 8-11, vulnerabilidad Alta 12-15.

Para los puentes y box culvert, se diseñó una rúbrica que combina criterios propuestas en la Guía de inspección de obras de drenaje del INVIAS y criterios desarrollados por la UNGRD. En conjunto se involucran siete variables (Tabla 2): la presencia de grietas, hundimiento e integridad de la estructura, socavación, deterioro del material, obstrucción de la sección transversal, evidencia de niveles máximos a la que se ha visto expuesto y presencia de material transportado en el cauce.

En este caso la sumatoria tendrá un valor mínimo de 7 y máximo de 21, que se reclasifica en vulnerabilidad Baja para un resultado entre 7 y 10, vulnerabilidad Media entre 11 y 15, vulnerabilidad Alta entre 16 y 21.

Tabla 2. Rubrica de vulnerabilidad física ante inundaciones de box culvert y puentes

Variable	Valor de la vulnerabilidad		
	Baja (1)	Media (2)	Alta (3)
Grietas	No se observan grietas que afecten el comportamiento de la estructura o puedan generar fallas a largo plazo	Se observan grietas mínimas inferiores a 1 mm de espesor, el área afectada es mínima y se relaciona con fenómenos de expansión y contracción	Se observan grietas en una amplia superficie de la estructura, estas grietas inducen a la falla del elemento, la pérdida parcial o total de la tubería, y representan una amenaza a la integridad de la estructura
Hundimientos e integridad de la estructura	No se observa hundimiento o aplastamiento en la tubería o estructura de drenaje	Se observa hundimiento leve de la estructura sin generar afectaciones en la integridad de la estructura	Se observa hundimiento o aplastamiento diferencial que genera daños en la estructura o fallas en los elementos de la misma
Socavación	Se presenta una estructura de descarga en óptimas condiciones, no se evidencia pérdida de material en la entrada o salida de la alcantarilla.	Se presenta pérdida de material en la entrada o salida de la estructura de forma moderada sin generar hundimientos, colapso o pérdida en la estabilidad de la estructura.	Se presenta pérdida de material de manera excesiva en la entrada o salida de la estructura generando hundimientos, desportillamientos o una socavación de la estructura debido a la ausencia, colapso o fracturamiento de disipadores y obras para control de erosión
Deterioro del material	Material en buen estado, una superficie limpia y sin imperfecciones considerables	El material presenta desgaste, su rugosidad aumenta y se evidencia fragilidad de este, pero sin pérdida de partículas ni exposición del acero de refuerzo	Material con imperfecciones, presenta raíces y cuerpos extraños, su rugosidad es alta, hay pérdida de partículas y queda expuesto el acero de refuerzo
Obstrucción de la sección transversal	Menos del 10% de la sección se encuentra con material tanto transportado como del que proviene de taludes adyacentes	La estructura se encuentra obstruida hasta un porcentaje que puede llegar a alcanzar un 30% de la sección	La estructura presenta obstrucción en más del 30% de su sección
Evidencia de niveles máximos	Se evidencian láminas de agua por debajo del 30% de la altura total	Se evidencian láminas de agua por ente 30% y 80% de la altura total	Se evidencian láminas de agua superiores al 80% de la altura total (borde libre inferior al 20%).
Presencia de material transportado durante flujos torrenciales o deslizamientos	No se observa material removido ni vegetación en el cauce aguas arriba de la estructura ni en su interior que pueda generar obstrucción del flujo en gran magnitud	Se evidencian rocas y material que obstruye levemente el flujo, lo mismo que rastros de vegetación, pero no se evidencian niveles máximos de severidad alta	Se observan rocas, arbustos y material aguas arriba o dentro de la estructura, la obstrucción genera un aumento considerable de la lámina de agua

En el caso de las vías, se diseñó una rubrica que involucra tres componentes de vulnerabilidad física ante inundaciones, como son: la cercanía al cuerpo de agua, el estado de conservación de la superficie de rodadura y la evidencia de zonas propensas a deslizamientos. La rúbrica considera la posibilidad que la superficie de rodadura se encuentre construida en pavimento rígido, pavimento flexible o simplemente en afirmado, como se muestra en la Tabla 3. En la evaluación se incluye la existencia y estado de conservación de elementos complementarios a la vía, como son las cunetas y drenajes, los cuales son importantes para asegurar el flujo de las aguas de escorrentía sin que se ocasionen procesos erosivos sobre la infraestructura.

Considerando las tres variables, la vulnerabilidad total tendría mínimo 3 y máximo 9, que se reclasifica en Baja para un resultado entre 3 y 4, vulnerabilidad Media entre 5 y 6, vulnerabilidad Alta entre 7 y 9.

Tabla 3. Rubrica de vulnerabilidad física ante inundaciones de vías terciarias

Variable	Valor de la vulnerabilidad		
	Baja (1)	Media (2)	Alta (3)
Localización de la vía con respecto a zonas de retiro de fuentes de agua y zonas de riesgo identificadas	A más de 70 metros del cauce	De 30 a 70 metros del cauce	Dentro de la zona de ronda (menos de 30 metros)
Estado de conservación de la superficie de rodadura	Superficie en pavimento flexible o concreto, con cunetas laterales, sin grietas y en buen estado de conservación	El pavimento presenta grietas y deformaciones que no comprometen la circulación por la vía. Existe separación entre juntas de construcción ocasionando grietas y pérdida de agregado. Las cunetas y obras de drenaje se encuentran agrietadas y con acumulación de sedimentos	Superficie en afirmado, sin cunetas ni obras de drenaje. Presenta deformaciones como ondulaciones y hundimientos, se observa pérdida de agregado de la estructura
Accesibilidad a la vía	La vía cuenta con dos o más rutas alternas de acceso a la zona en caso de presentarse un evento natural que afecte la circulación por la vía	La vía cuenta con al menos una ruta alterna de acceso a la zona en caso de presentarse un evento natural que afecte la circulación por la vía	La vía no cuenta con vías alternas de acceso a la zona en caso de presentarse un evento natural que afecte la circulación por la vía

Siguiendo la misma metodología, para los postes de la red eléctrica se diseñó una rubrica con las siguientes variables: la localización de los postes con respecto a la fuente de agua y zonas de riesgo identificadas, la respuesta estructural y la estabilidad del terreno en donde se encuentra (Tabla 4). Al igual que con las vías, la sumatoria de variables oscila entre un mínimo de 3 y máximo de 9, que se reclasifica en vulnerabilidad Baja para un resultado entre 3 y 4, vulnerabilidad Media entre 5 y 6, vulnerabilidad Alta entre 7 y 9.

Tabla 4. Rubrica de vulnerabilidad física ante inundaciones de postes de red eléctrica

Variable	Valor de la vulnerabilidad		
	Baja (1)	Media (2)	Alta (3)
Localización de los postes con respecto a zonas de retiro de fuentes de agua y zonas de riesgo identificadas	A más de 70 metros del cauce	De 30 a 70 metros del cauce	Dentro de la zona de ronda (menos de 30 metros)
Respuesta estructural	Los postes no son alcanzados por la creciente del río y en caso de alcanzarlos el impacto es bajo, sin inducir desplazamientos o daños	Los postes son alcanzados por el desbordamiento del río, induciendo desplazamientos e inclinaciones en los postes, sin comprometer las líneas de tensión y sin interrumpir el servicio	En caso de ser alcanzados por la creciente, los postes serían derribados o fragmentados por el flujo y material transportado, las líneas de tensión se ven afectadas y se interrumpe el servicio
Estabilidad del terreno	El terreno es estable, con revestimiento o cobertura vegetal, y sin evidencia de socavación	El terreno es estable, pero se encuentra expuesto a la acción erosiva del río	Se observan movimientos de suelo en el talud y evidencias de socavación asociadas al flujo del agua

2.3 Análisis de vulnerabilidad de los elementos expuestos

La correlación entre la valoración de vulnerabilidad de cada elemento, las variables consideradas y su localización respecto al cauce de la quebrada La Laja, permitió identificar las condiciones que aportan mayor vulnerabilidad, así como la priorización de acciones de mitigación o reducción del riesgo.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La cuenca de la quebrada La Laja tiene un área de 23,9 km² y una longitud de cauce principal de 10,09 km hasta su desembocadura en el río Juan López. Uno de los principales afluentes del río Sumapaz. Su pendiente media es del 5% comprendida entre los 1400 y 817 msnm.

Aunque el factor de forma (0,23) da cuenta de una cuenca alargada con baja tendencia a crecientes súbitas, los antecedentes históricos demuestran la ocurrencia de flujos torrenciales con alta velocidad y alta capacidad de transporte de cantos rodados y rocas de gran tamaño, lo anterior producto de combinación de la alta pendiente y precipitaciones máximas en 24 horas entre 63,4mm y 102,5mm.

La cuenca se conforma principalmente por suelos tipo Vlt, caracterizados por pendientes pronunciadas, erosión moderada y poca profundidad efectiva debido a la presencia de piedras dentro del perfil, así mismo, la cobertura vegetal predominante en la cuenca es mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con un 67% del territorio. Esta combinación de pendiente, tipo de suelo y cobertura vegetal, le otorga a la cuenca de la quebrada La Laja alta capacidad de escorrentía superficial, representada en un número de curva CN=82,98 en condiciones húmedas.

La ocupación del territorio en inmediaciones a la quebrada La Laja sigue una distribución lineal respecto al cauce de la quebrada, mientras que la infraestructura vial atraviesa en sentido oriente-occidente el cauce, condición que repercute en la exposición a inundaciones tanto de las viviendas como de la infraestructura vial y de servicios públicos, que para este caso corresponden siete viviendas residenciales tipo finca, tres box culvers, dos postes que hacen parte de la red eléctrica y dos vías.

3.1 Vulnerabilidad física de las viviendas

El terreno sobre el cual se ubican la mayoría de las viviendas no evidencia procesos erosivos y deslizamientos que den cuenta de posible inestabilidad, lo cual concuerda con el lecho rocoso de la quebrada La Laja, sin embargo, antigüedad mayor a 20 años, su ubicación dentro de la zona de ronda a menos de 30m del cauce, así como la combinación de materiales y sistemas constructivos, propios de la autoconstrucción, ocasionan el predominio de una amenaza alta.

En la medida que las viviendas se aproximan más al cauce, aparecen procesos erosivos, que a su vez se incrementan por la deforestación y pérdida de cobertura vegetal, otorgando a la vulnerabilidad un carácter dinámico asociado a las pautas de poblamiento y ocupación del territorio (Tabla 5).

Tabla 5. Clasificación de vulnerabilidad de viviendas

Vivienda 1

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'50" N/74°30'21" W

Construcción ubicada dentro de la ronda de la quebrada La Laja (30m), compuesta por un sistema estructural de pórticos (vigas y columnas), con una combinación de materiales desde bloques de arcilla, rocas y aluminio, sin cumplir los parámetros constructivos recomendados por la norma NSR10. El terreno adyacente presenta buena cobertura vegetal y sin evidencia de procesos de remoción en masa o zonas de inestabilidad.



		Variable			Total	Vulnerabilidad
Antigüedad	Materiales	Norma	Suelo	Localización		
2	2	3	1	3	11	Media

Vivienda 2:

Ubicación: vereda El Chaparro Coordenadas:04°10'50"N/74°30'22" W

Esta vivienda se encuentra ubicada a menos de 10m de la quebrada La Laja, la mancha café en la losa de cimentación y fachada evidencia la ocurrencia de inundaciones. Estructuralmente se compone de un sistema porticado simple con presencia de madera en su fachada. El terreno tiene una cobertura vegetal media y se ubica cerca de una zona inestable.



Antigüedad	Materiales	Variable			Total	Vulnerabilidad
		Norma	Suelo	Localización		
2	2	3	2	3	12	Alta

Vivienda 3

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'47" N/74°30'30" W

Esta edificación se encuentra dentro de la ronda de la quebrada La Laja (menos de 30). Presenta un alto deterioro en sus materiales de construcción, a su vez se encuentra ubicada en una zona con probabilidad de deslizamiento y escasa cobertura vegetal.



Antigüedad	Materiales	Variable			Total	Vulnerabilidad
		Norma	Suelo	Localización		
2	2	3	3	3	13	Alta

Vivienda 4

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'51" N/74°30'21" W

Esta vivienda no cumple los requisitos mínimos de la norma NSR10, por cuanto se construyó combinando distintos materiales como son hormigón, arcilla y aluminio, la distancia entre columnas es muy alta y las vigas son muy pequeñas. Aunque el suelo es estable y de baja pendiente, se encuentra en la ronda de la quebrada.



Antigüedad	Materiales	Variable			Total	Vulnerabilidad
		Norma	Suelo	Localización		
2	2	3	2	3	12	Alta

Vivienda 5

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'55" N/74°30'24" W

Esta vivienda se encuentra ubicada dentro de la ronda de la quebrada, a menos de 10m de su cauce. Fue construida sobre la roca y es separada del cauce por medio de un muro de concreto construido por su propietario, sin embargo, históricamente ha presentado eventos de inundación en los cuales se ha visto comprometido su sistema estructural.



Antigüedad	Materiales	Variable			Total	Vulnerabilidad
		Norma	Suelo	Localización		
2	2	3	3	3	13	Alta

Vivienda 6

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'53" N/74°30'25" W

Esta edificación de un piso con un sistema estructural simple (Vigas y columnas) se encuentra ubicado en la zona de influencia de la quebrada (menos de 30m) presenta desgaste en sus materiales de construcción, y evidencia de niveles de agua por inundaciones en sus paredes exteriores. El terreno es plano, sin evidencia de inestabilidad ni procesos erosivos.



Antigüedad	Materiales	Variable			Total	Vulnerabilidad
		Norma	Suelo	Localización		
3	2	3	1	3	12	Alta

Vivienda 7

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'51,1"N/74°30'25,2" W

Esta es la vivienda que se encuentra más alejada de la zona de influencia de la quebrada, se encuentra construida con una combinación de materiales de concreto, madera, bloque de arcilla y aluminio, no cuenta con un diseño estructural debido a su antigüedad (mayor a 25 años), presenta fallas por cortante en algunos de sus muros que se evidencian por la presencia de grietas






Antigüedad	Materiales	Variable			Total	Vulnerabilidad
		Norma	Suelo	Localización		
3	2	2	2	2	11	Media

3.2 Vulnerabilidad física de box Culvert

Las tres estructuras tipo box Culvert están construidas en concreto reforzado, cimentadas sobre roca en buen estado, sin evidencia de daño u obstrucción que comprometa su funcionalidad y estabilidad, sin embargo, producto de los flujos torrenciales el material presenta signos visibles de desgaste, dando lugar a una valoración de vulnerabilidad media en los box Culvert 1 y 2 (Tabla 6).

Tabla 6. Clasificación de vulnerabilidad de box Culvert

<p>Box culver 1 Ubicación: vereda El Chaparro Coordenadas: 04°10'51,9"N/74°30'22,1" W Esta estructura fue construida en concreto reforzado, cimentado directamente en la roca de la quebrada, sin presencia de hundimientos y socavación. Aunque la sección no se encuentra obstruida por sedimentos, escombros o vegetación, si hay evidencia de niveles de agua altos que ocasionan el desgaste del material de construcción.</p>									
Variable							Total	Vulnerabilidad	
Grietas	Hundimientos	Socavación	Deterioro	Obstrucción	Niveles de agua	Material transportado			
2	1	2	2	1	3	2	13	Media	
<p>Box culver 2 Ubicación: vereda El Chaparro Coordenadas: 04°10'52" N/74°30'24,5" W Estructura construida en concreto reforzado con presencia de agrietamientos y pequeñas zonas de hundimientos. El material presenta desgaste debido a la abrasión por flujos de alta velocidad y alto niveles de lámina de agua. Aunque en el lecho hay cantos rodados, la sección no se encuentra obstruida con vegetación, sedimentos o escombros.</p>									
Variable							Total	Vulnerabilidad	
Grietas	Hundimientos	Socavación	Deterioro	Obstrucción	Niveles de agua	Material transportado			
2	2	1	3	1	3	1	13	Media	
<p>Box culver 3 Ubicación: vereda El Chaparro Coordenadas: 04°10'17" N/74°30'28,9" W Esta estructura es la que mejor condición tiene debido a su poco tiempo de construcción, no presenta niveles de agua muy altos debido a que su altura es superior a los 8 metros, ni obstrucciones gracias a su ancho. En sus paredes laterales presenta un poco de desgaste por los factores climáticos de la zona.</p>									
Variable							Total	Vulnerabilidad	
Grietas	Hundimientos	Socavación	Deterioro	Obstrucción	Niveles de agua	Material transportado			
1	1	1	2	1	1	1	8	Baja	

Los factores que más influyen en esta valoración son el deterioro del material, la evidencia de niveles máximos y la presencia de grietas, factores que pueden mitigarse mediante mantenimiento preventivo. En el caso del tercer box Culvert se obtiene una vulnerabilidad baja debido a que la estructura tiene una altura importante, además no presenta deterioro en el material ni tampoco agrietamientos ni obstrucciones.

3.3 Vulnerabilidad física de vías

Aunque las dos vías analizadas se localizan muy cerca de la quebrada La Laja, el estado de conservación resulta determinante en la evaluación de la vulnerabilidad, obteniendo una calificación media para la vía terciaria con placa huella en concreto (Tabla 7), mientras que la vía secundaria arroja una calificación alta producto del excesivo desgaste de la superficie de rodadura y las obras de drenaje.

La vía secundaria originalmente contaba con pavimento flexible, pero producto de la falta de mantenimiento, ha alcanzado un deterioro excesivo, perdiendo la superficie de rodadura y las cunetas. En contraste, la vía terciaria producto de una intervención integral en superficie y obras de drenaje redujo sustancialmente su vulnerabilidad, demostrando el carácter dinámico de la vulnerabilidad física de las obras de infraestructura, así como las posibilidades de mitigación del riesgo mediante medidas estructurales.

Tabla 7. Clasificación de vulnerabilidad de vías

Vía pavimento flexible

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'51,1" /74°30'25,2" W

Esta vía hace parte del catálogo nacional de vías secundarias de las cuales está encargado el INVIAS, como se puede ver en la fotografía su carpeta asfáltica está totalmente desgastada, su estructura de drenaje desapareció y se encuentra en una zona que ha presentado derrumbes. Se cuenta con vías alternas, que, aunque aumentan los tiempos de viaje, permiten la movilidad de la comunidad.



Variable			Total	Vulnerabilidad
Localización	Estado de conservación	Accesibilidad		
3	3	2	8	Alta

Vía pavimento rígido

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'47" N/74°30'19" W

Esta es una vía terciaria cuyo mantenimiento está a cargo del municipio, recientemente en este tramo se construyó una placa huella y obras de drenaje, mejorando considerablemente su funcionalidad.

La obra se encuentra en perfectas condiciones ya que fue construida hace menos de 3 años.



Variable			Total	Vulnerabilidad
Localización	Estado de conservación	Accesibilidad		
3	1	2	8	Media

En la zona de estudio se tienen dos vías una de pavimento flexible y otra de pavimento rígido, en la fotografía de reconocimiento la vía con pavimento flexible presenta un deterioro evidente y presenta una clasificación de vulnerabilidad alta teniendo como factores más críticos su cercanía con la zona identificada de amenaza, su mal estado de la carpeta asfáltica y su accesibilidad. Para la vía de pavimento flexible se obtuvo una clasificación de vulnerabilidad media debido a que su estado de conservación en la zona de estudio es bueno y fue de construcción reciente y otras vías de acceso.

3.4 Vulnerabilidad física de la red eléctrica

En la zona analizada se tiene dos postes de servicio de red eléctrica (Tabla 8), uno de ellos de material plástico y el otro de hormigón, se obtuvo que el poste dos obtuvo una clasificación media debido todas sus variables se encuentran en el rango de clasificación media, lo contrario al poste uno de material plástico que se encuentra sobre la vía principal, en una zona inestable y cerca de la ronda de la quebrada La Laja.

Tabla 8. Clasificación de vulnerabilidad de red eléctrica

Poste 1

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'54,9" N/74°30'23,2" W

Su material de construcción es plástico, se encuentra ubicado dentro de la ronda de influencia de la quebrada y presenta socavaciones y probabilidades de colapsar por deslizamiento desde el talud superior, afectando el suministro de energía.



Variable			Total	Vulnerabilidad
Localización	Respuesta estructural	Estabilidad del terreno		
3	3	3	9	Alta

Poste 2

Ubicación: vereda El Chaparro

Coordenadas: 04°10'51,1" /74°30'25,2" W

Este poste de red eléctrica está construido en concreto simple, presenta una leve inclinación, se encuentra a más de 30 metros de la zona de influencia de la quebrada, a su vez presenta un desgaste en su material debido a los constantes cambios de clima que se presentan en la zona.



Variable			Total	Vulnerabilidad
Localización	Respuesta estructural	Estabilidad del terreno		
2	2	2	6	Media

3.5 Vulnerabilidad física de infraestructura rural ante inundaciones

Debido a que uno de los factores más influyentes en la determinación de la vulnerabilidad total, es la vulnerabilidad física podemos decir que está determinada esencialmente por las condiciones en las que se

encuentran las diferentes estructuras, considerando su material, estado de conservación, proceso constructivo, antigüedad y posible respuesta ante el desbordamiento del cuerpo de agua. En el caso de los elementos expuestos ante inundaciones de la quebrada La Laja, se identifican tres factores determinantes:

- La combinación de distintos materiales y sistemas constructivos, asociado a la autoconstrucción de las viviendas.
- La proximidad al cuerpo de agua, invadiendo la zona de ronda y desconociendo la capacidad del flujo para generar condiciones amenazantes.
- La falta de mantenimiento hasta el punto de ocasionar la capacidad de respuesta de la obra ante el flujo del agua, ya sea directamente por el cuerpo del agua o por escorrentía superficial.

Para las obras viales y de servicios públicos suele contarse con recursos públicos para su mantenimiento y reposición, pero en el caso de las viviendas la ejecución de obras y medidas de mitigación queda en manos de los propietarios, generalmente con restricción tanto en recursos económicos como en el acceso a personal técnico calificado. Como resultado, podemos ver que ninguna de las estructuras de tipo habitacional cumple con la norma sismo resistente NSR-10, esto se debe a la antigüedad de las viviendas y que en su época de construcción no se contaba con una correcta supervisión de las construcciones que se realizaban en los predios, sin embargo, los habitantes de la zona siguen manifestando que no hay control por parte de las entidades departamentales del cumplimiento de los requisitos sismo resistentes de construcción en las zonas rurales. Adicionalmente predomina la auto construcción caracterizada por la combinación de distintos sistemas estructurales, de manera que en una misma vivienda hay elementos con distinta rigidez y deformaciones que aumentan su vulnerabilidad.

Dos de los tres box Culvert analizados hacen parte de una vía que esta categorizada como principal lo cual quiere decir que el INVIAS se debe encargar de su respectivo mantenimiento e inspección. La inspección visual de estas obras permitió determinar que en uno de ellos se presentan daños medios los cuales llevan mucho tiempo sin su respectivo mantenimiento, el análisis de vulnerabilidad arrojó una valoración entre media y alta debido a que presentan desgaste en su material de construcción.

En el caso de las redes eléctricas su vulnerabilidad está condicionada a la proximidad al cauce y la evidencia de procesos erosivos en el suelo por lo cual indica pérdida de capacidad portante, inclinaciones y posible suspensión del servicio de energía en la zona.

En cuanto a los resultados obtenidos en la estimación de la vulnerabilidad física de la vía podemos decir que la vía principal se encuentra en mal estado y teniendo en cuenta que su frecuencia vehicular es considerable por el transporte de mercancías es importante que la alcaldía del municipio haga el respectivo mantenimiento.

Al realizar una comparación entre las dos vías analizadas que una es de categoría secundaria y la otra terciaria se puede observar una reducción en la vulnerabilidad de la vía terciaria debido a el estado de conservación del material de construcción, el cual incluye una carpeta asfáltica en buen estado y obras de drenaje funcionando correctamente.

Una condición natural de las obras de drenaje, vías, box Culvert y puentes, es su continua exposición a crecientes y escorrentía, cuya persistencia e intensidad puede dar lugar a la aparición de patologías que demandan un mantenimiento rutinario, y que en caso de no corregirse ocasionan un aumento de su vulnerabilidad.

Las obras para cruce sobre cuerpos de agua suelen construirse en concreto reforzado, cuyas deficiencias más comunes van desde el simple desgaste del concreto por abrasión hasta el colapso de los estribos por socavación (Figura 5), llegando a afectar su estabilidad y funcionalidad. En el caso del desgaste por abrasión, el acero de refuerzo queda expuesto a la acción corrosiva del agua y la humedad, condición que puede corregirse fácilmente, pero si se deja progresar puede reducir su respuesta estructural. El colapso de una parte de la estructura, ya sea una viga horizontal o un estribo lateral, puede ser el resultado del impacto de

rocas de gran tamaño o de la socavación por flujos torrenciales, condición que ocasiona una evidente pérdida de la infraestructura y demanda en muchos casos su reposición.



Figura 5. Viga de un puente con deterioro del concreto por abrasión, ocasionando la exposición del acero de refuerzo (izq) y colapso de una viga por impacto de material transportado por el río

El material aluvial se caracteriza por una matriz de suelos de diverso tamaño y con distinto grado de cohesión, en consecuencia, ante la acción erosiva del agua puede presentarse la socavación del material sobre el cual se construyen los puentes y box Culvert (Figura 6), ocasionando el posible colapso de la estructura y la restricción a la circulación por un tiempo prolongado. Su mitigación exige la construcción de obras de protección como muros de gavión, espolones y muros en concreto reforzado.



Figura 6. Socavación de un estribo y fundación de un puente, cimentado sobre material aluvial

Cuando se permite el avance de la socavación sobre los estribos y estructuras laterales de las obras de cruce, se induce el fracturamiento de los componentes de la estructura, su desprendimiento y colapso, dejando la estructura expuesta a la acción del agua (Figura 7). En estos casos, aunque se construyan medidas de mitigación, es posible que la estabilidad de la estructura ya se vea comprometida, aumentando significativamente su vulnerabilidad y fragilidad.



Figura 7. Colapso de estribos y obras de protección ante socavación

Cuando las vías se construyen siguiendo un alineamiento paralelo a los cuerpos de agua, o su localización respecto al cauce permite el impacto directo del agua sobre el talud, ocasiona la progresiva socavación del talud inferior y la consecuente pérdida de la calzada (Figura 8), hasta el punto de restringir totalmente la circulación. Aunque el problema parte de una inadecuada localización respecto al cauce, su impacto puede mitigarse mediante obras de defensa, que suelen ser costosas.



Figura 8. Socavación de la calzada vial por su proximidad al cuerpo de agua

De esta manera, puede resaltarse que el impacto de las inundaciones sobre la infraestructura rural no se limita a la presencia temporal de una lámina de agua sobre terrenos o estructuras que normalmente se encuentran secas, sino que se extiende a la acción erosiva y al impacto por materiales transportados por los cuerpos de agua, cuyas consecuencias suelen ser progresivas hasta ocasionar el colapso de la infraestructura y la pérdida de funcionalidad.

De acuerdo con [8], no se puede predecir cómo, cuándo o dónde ocurrirá un evento adverso, pero sí se puede lograr reducir la vulnerabilidad ante ellos, y para lograrlo es preciso educar y empoderar a la población más expuesta a ocurrencia de eventos adversos, fundamento que cobra mayor relevancia en un entorno rural caracterizado por la dispersión de la población y la poca presencia de actores institucionales. También menciona la necesidad de construir nuevas oportunidades de producción y asentamiento en el territorio en condiciones de seguridad aceptable, objetivo que solo puede conseguirse trabajando con la comunidad.

4. CONCLUSIONES

Debido a que uno de los factores más influyentes en la determinación de la vulnerabilidad total, es la vulnerabilidad física podemos decir que, esta está determinada esencialmente por las condiciones en las que se encuentran las diferentes estructuras.

En los resultados obtenidos se puede observar que ninguna de las estructuras de tipo habitacional cuentan con el cumplimiento de la norma constructiva que rige (NSR-10), esto se debe a la antigüedad de las viviendas y que en su año constructivo no se contaba con una correcta supervisión de infraestructura en la zona rural del país, sin embargo los habitantes de la zona sigue manifestando que no hay control por parte de las entidades departamentales del cumplimiento de los requisitos sismo resistentes de construcción en las zonas en esta zona.

Dos de los tres box Culvert analizados hacen parte del catálogo de vías principales lo cual quiere decir que el INVIAS se debe encargar de su respectivo mantenimiento e inspección, sin embargo se pudo observar que en uno de ellos se presentan daños altos los cuales llevan mucho tiempo sin su respectivo mantenimiento lo cual puede causar ante la presencia de un evento de amenaza un alto riesgo para la comunidad que hace parte de la zona.

En cuanto a los resultados obtenidos en la estimación de la vulnerabilidad física de la vía podemos decir que la vía principal se encuentra en mal estado y teniendo en cuenta que su frecuencia vehicular es de importante relevancia por el transporte frecuente de mercancías es importante que la alcaldía del municipio haga gestión de mantenimiento.

Se logro evaluar los factores de vulnerabilidad de las estructuras a los que están expuestos los habitantes de la vereda el Chaparero en la zona de la quebrada la Laja, debido a un eventual desbordamiento de esta, obteniendo para un periodo de retorno de 10 años una vulnerabilidad alta, de igual manera se obtuvo para los periodos de 50 y 100 años lo cual nos indica lo peligrosa que es la cuenca en temporada invernal.

En el análisis del grado de vulnerabilidad se pudo encontrar que todas las viviendas de la zona se encuentran con un grado de vulnerabilidad alto debido a que están cercanas a la quebrada y que no cuentan con los requisitos que exige la NSR10 debido al poco control que se realiza en las zonas rurales de Colombia.

En el contexto de la realización de este trabajo se demostró que la que quebrada La Laja puede presentar la conducción de un alto caudal en época invernal, y debido a que esa zona es frecuentada por turistas que visitan el sector, es recomendable alentarlos que ante altas precipitaciones mejor no bañarse en ella.

Se evidencio que las viviendas de las zonas han tomado diferentes medidas como lo son ampliación de muros y construcción de estos mismo para que no se repitan daños ocasionados anteriormente por eventos de desbordamiento de la quebrada, sin embargo, hay que general su respectiva supervisión a medida que pase el tiempo por los aumentos del caudal.

REFERENCIAS

- [1] Blaikie P. et al. (1996) Vulnerabilidad: El entorno social, político y económico de los desastres. Tercer Mundo.
- [2] Alcaldía del Municipio de Icononzo. (2016). Esquema de Ordenamiento Territorial. Icononzo, Tolima.
- [3] American Concrete Institute. (2013). Control de Fisuración en Estructuras de Hormigón. Documento ACI224R-01.
- [4] Servicio Geológico Colombiano. (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá.
- [5] UNGRD. (2010). Guía metodológica para la elaboración de Planes Departamentales para la Gestión del Riesgo. Unidad nacional de gestión del riesgo de desastres.
- [6] CEPAL. (2020). La planificación para el desarrollo y la gestión del riesgo de desastres Recuperado: <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/nota/la-planificacion-para-el-desarrollo-y-la-gestion-del-riesgo-de-desastres>
- [7] Procuraduría General de la República. (2022) Recuperado: https://www.procuraduria.gov.co/portal/PROCURADURIA-SOLICITO_INCLUIR_NORMAS_DE_PROTECCION_A_BIENES_DE_INTERES_CULTURAL_EN_PLANES_DE_ORDENAMIENTO_TERRITORIAL.news
- [8] Veitia Y. (2021). Evolución histórica de la concepción de la gestión de riesgos de desastres: Algunas consideraciones. Revista Kawsaypacha 7, 67-81.

Caracterización de las precipitaciones como primer detonante en la evaluación multi riesgo de los fenómenos de origen natural

Yeison A. Mosquera Valencia¹

Deison Cárdenas Espinal²

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Colombia

En el dimensionamiento de las obras de ingeniería como medidas estructurales en la gestión integral el riesgo por inundaciones rápidas, lentas o avenidas torrenciales, es importante caracterizar la precipitación como primer detonante en la evaluación multi riesgo en los fenómenos de origen natural. Como práctica ingenieril en el diseño es usual realizar este análisis mediante la implementación de curvas intensidad duración y frecuencia IDF, que relacionan la intensidad de la lluvia en función de la duración, y también existen metodologías de amplio uso [1], o mediante la implementación de análisis de frecuencias de funciones de probabilidad de extremos tipo Gumbel, GEV, Pearson, entre otros. Es un hecho que, debido a las intervenciones humanas en el ambiente natural, cambios de usos de suelos, deforestaciones a gran escala y en periodos de tiempos largos, incremento de gases efectos invernadero, han cambiado las características de la respuesta hidrológica expresadas en la magnitud y frecuencia de las crecidas extremas o de las precipitaciones extremas, por lo que es válido afirmar que la estacionariedad de las variables hidrológicas está *muriendo* [2].

¹ Ingeniero Civil, Especialista en Gestión del Riesgo de desastres, Especialista en Ingeniería del recurso hídrico y Estudiante de Maestría en Ingeniería.

Contacto: Yemosva06@gmail.com, yemosva@hotmail.com, yeison_mosquera95103@elpoli.edu.co

² Ingeniero Civil, Especialista en Gestión del Riesgo de desastres y Magíster en Ingeniería.

Contacto: deison.cardenas@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos extremos de lluvia en Colombia, causan con mayor frecuencia efectos adversos para la sociedad dadas las vulnerabilidades particularidades en cada región del país, entender que somos un país de regiones y que cada cual tiene asociadas eventos propios que se reflejan en el territorio en mayor o menor intensidad es crucial. El municipio de Medellín no ha sido ajeno a dicha problemática, históricamente las precipitaciones han causado en la mayoría de las cuencas de la ciudad aumentos en sus niveles que se reflejan en crecientes súbitas que superan para la mayoría de los casos los periodos de retorno para los que se diseñan las obras hidráulicas, tal problemática genera en la actualidad desbordamientos de los cauces principalmente en las partes bajas de las cuencas dadas las consideraciones físicas del fenómeno en los que la escorrentía superficial directa es extremadamente alta superando en mayor medida la capacidad de respuesta de los cauces u obras hidráulicas.

Es allí en donde las consideraciones tradicionales de los eventos extremos de lluvia que consideran una distribución estacionaria e independiente de los eventos extremos, se tornan en un enfoque obsoleto, olvidando la covariancia en las variables hidrológicas tiempo, índices NAO, Índices oceánicos ENSO, ONI, SOI. Bajo la aproximación de adaptar los modelos existentes para eventos extremos de lluvia, modelando las distribuciones como funciones del tiempo [3-5], complementado con la implementación de herramientas computaciones de programación que permiten realizar un análisis en código y visualización más ágil, se pretende en el presente artículo sentar un precedente en el uso de las herramientas de libre distribución en el medio, que a través de su conocimiento, permiten una gestión del riesgo de desastres de origen natural, ligado a los avances y descubrimientos científicos en un mundo cada vez más cambiante.

Como elemento vulnerable, se selecciona la quebrada la presidenta en el barrio el poblado del municipio de Medellín, la cual históricamente ha sufrido de inundaciones asociadas al periodo Bi-modal de Lluvias del departamento de Antioquia, siendo una cuenca antrópica con un alto grado desarrollo inmobiliario, dada su ubicación geoestratégica para el sector de la construcción en la ciudad. En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran algunos eventos de inundación en la parte baja de la cuenca de la quebrada La presidenta.



Figura 1. Inundación causada por el desbordamiento de la quebrada La Presidenta [6]



Figura 2. Lluvias causan desbordamiento de la quebrada La Presidenta [7]



Figura 3. Desbordamiento de la quebrada La Presidenta [8]

2. MARCO REFERENCIAL

En el marco de la verificación de la estacionariedad o no homogeneidad de una variable hidrológica, registrada en una serie de datos, se emplean técnicas estadísticas a manera de test como lo son el de la tendencia media (Mann-Kendall), cambio de la función de distribución (Pettite), cambio de la varianza en un punto dado (Prueba F). Para efectos de la presente investigación se realizará el análisis de estacionariedad de la lluvia, tomando como dato de entrada una serie multianual de precipitación máxima con incidencia a la zona de estudio, a la cual se le realiza el test de Man Kendall en R, para identificar la tendencia de los datos en función de la media y covarianza, para un nivel de significancia del 5%, considerando como hipótesis nula el rechazo de la prueba si $p\text{-value} > \alpha$ o mejor; si $p\text{-value} < 0,05$ (serie ESTACIONARIA); si $p\text{-value} > 0,05$ (serie No ESTACIONARIA).

Dentro de las bondades que tiene la implementación del test de Mann-Kendall, se puede resaltar el hecho de que el mismo compara todos los pares de datos, identifica si la variable va creciente o decreciendo desde cualquier punto de la muestra, no identifica el tipo de tendencia por lo que se presume que es lineal, cuenta con un número de incrementos y resta el número de disminuciones.

2.1 Modelo valor extremo Gumbel

La fórmula para el cálculo del valor extremo Gumbel estacionario se presenta en las ecuaciones (1) y (2).

$$F(x) = u - \alpha * LN(-LN(f(x))) \quad (1)$$

u: parametro de localizacion
α: parametro de escala

$$f(x) = 1 - \frac{i-a}{N+1-2a} \text{ (probabilidad acumulada empírica)} \quad (2)$$

$a = 0,44$ (Grigorten)
N: número total de datos
i = orden del dato (de mayor a menor)

2.2 Modelo valor extremo Gumbel o estacionario 1

La fórmula para el cálculo del Valor extremo Gumbel no estacionario 1, que considera tendencia lineal y dependiente del tiempo en el parámetro de localización se presenta en las ecuaciones (3) y (4).

$$F(x) = U(t) - \alpha * LN(-LN(f(x))) \quad (3)$$

ut: parametro de localizacion = $\mu_0 + \mu_1 t$

Donde, μ_1 determina la tasa de cambio de la variable con una tendencia lineal en el parámetro de localización.

$$f(x) = 1 - \frac{i-a}{N+1-2a} \text{ (probabilidad acumulada empírica)} \quad (4)$$

α: parametro de escala
 $a = 0,44$ (Grigorten)
N: número total de datos
i = orden del dato (de mayor a menor)

2.3 Modelo valor extremo Gumbel no estacionario 2

La fórmula para el cálculo del Valor extremo Gumbel no estacionario 2, que considera tendencia lineal y dependiente del tiempo en el parámetro de localización y escala se presenta en las ecuaciones (5) y (6).

$$F(x) = U(t) - \alpha(t) * LN(-LN(f(x))) \quad (5)$$

ut: parametro de localizacion = $\mu_0 + \mu_1 t$
*α(t): parametro de escala = $\alpha t = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 * t)$*

$$f(x) = 1 - \frac{i-a}{N+1-2a} \text{ (probabilidad acumulada empírica)} \quad (6)$$

a = 0,44 (Grigorten)
N: número total de datos
i = orden del dato (de mayor a menor)

2.4 Modelo del valor extremo GEV

La fórmula para el cálculo del Valor extremo GEV se presenta en las ecuaciones (7) y (8).

$$F(x) = u + \frac{\alpha}{K} * (1 - (-\text{LN}(f(x)))^k) \quad (7)$$

u: parametro de localizacion
α: parametro de escala
K: parámetro de forma

$$f(x) = 1 - \frac{i-a}{N+1-2a} \text{ (probabilidad acumulada empírica)} \quad (8)$$

a = 0,44 (Grigorten)
N: número total de datos
i = orden del dato (de mayor a menor)

2.5 Modelo del valor extremo GEV no estacionario 1

La fórmula para el cálculo del Valor extremo GEV No Estacionario 1, que considera tendencia lineal y dependiente del tiempo en el parámetro de localización se presenta en las ecuaciones (9) y (10).

$$F(x) = u(t) + \frac{\alpha}{K} * (1 - (-\text{LN}(F_x))^k) \quad (9)$$

ut: parametro de localizacion = μ0 + μ1t

Donde, μ1 determina la tasa de cambio de la variable con tendencia lineal en el parámetro de localización.

$$f(x) = 1 - \frac{i-a}{N+1-2a} \text{ (probabilidad acumulada empírica)} \quad (10)$$

α: parametro de escala
a = 0,44 (Grigorten)
N: número total de datos
i = orden del dato (de mayor a menor)

2.6 Modelo del valor extremo GEV no estacionario 2

La fórmula para el cálculo del Valor extremo GEV No Estacionario 2, que considera tendencia lineal y dependiente del tiempo en el parámetro de localización y escala, se presenta en las ecuaciones (11) y (12).

$$F(x) = u(t) + \frac{\alpha(t)}{K} * (1 - (-\text{LN}(f(x)))^k) \quad (11)$$

ut: parametro de localizacion = μ0 + μ1t
*α (t): parametro de escala = α t = exp(α0 + α1 * t)*

$$f(x) = 1 - \frac{i-a}{N+1-2a} \text{ (probabilidad acumulada empírica)} \quad (12)$$

a = 0,44 (Grigorten)
N: número total de datos
i = orden del dato (de mayor a menor)

2.7 Criterio de selección del mejor ajuste

Si bien existe una gran variedad de metodologías para la selección del mejor ajuste como lo son el método de la máxima verosimilitud y el método del criterio de información Akaike (AIC), al ser este último una

medida de desempeño del modelo que no involucra test de hipótesis, se define el mismo como criterio de ajuste en la presente investigación considerando el menor valor de AIC, para el cálculo del AIC se tiene la ecuación (13).

$$AIC = 2 * k - 2 * l(\theta) \quad (13)$$

K: número de parámetros

$l(\theta)$: valor de la máxima verosimilitud del modelo

3. MÉTODO

3.1 Etapa 01: Recopilación de información secundaria

Como información secundaria de precipitación de máximos multianual, se consulta información pluviométrica de la estación climática SANTA HELENA [27010810], con una longitud de registros de 50 años, situación que es favorable en cuanto a la longitud de los datos y cercanía a la cuenca de la quebrada la presidenta. Al tratarse de un análisis de variables hidrológicas, como es el caso de la precipitación como detonante en el análisis MULTIRIESGO, no se considera necesario caracterizar la morfometría, usos de suelo, pendientes, pérdidas y demás variables derivadas de un modelo de elevación digital. A continuación, en la Tabla 1, se describen los datos de precipitación máxima multianual entre los años 1971-2021.

Tabla 1. Valores de precipitación diaria máxima anual, estación Santa Helena [27010810]

Año	t	Precipitación Diaria Máxima Anual [mm]
1971	1	59
1972	2	56
1973	3	57
1974	4	254
1975	5	56
1976	6	47
1977	7	56
1978	8	50
1979	9	59
1980	10	58
1981	11	65
1982	12	60
1983	13	84
1984	14	99
1985	15	62
1986	16	56
1987	17	58
1988	18	61
1989	19	58
1990	20	80
1991	21	97
1992	22	52
1993	23	54
1994	24	80
1995	25	85
1996	26	50
1997	27	80
1998	28	80
1999	29	98
2000	30	76
2001	31	92
2002	32	95
2003	33	54
2004	34	67
2005	35	68
2006	36	83
2007	37	65
2008	38	56
2009	39	86
2010	40	65

2011	41	63
2012	42	67
2013	43	71
2014	44	56
2015	45	63
2016	46	109
2017	47	75
2018	48	93
2019	49	72
2020	50	69
2021	51	92

3.2 Etapa 02: Desarrollo del código computacional en R

Una vez determinada la serie histórica de precipitación máxima multianual, se procede a la realización del código en el lenguaje de programación R, se considera como premisa la implementación de código libre, de allí que se emplee la interfaz RSTUDIO-2022.02.3-492. En la Figura 4 se presenta la red de drenaje de la quebrada la Presidenta.

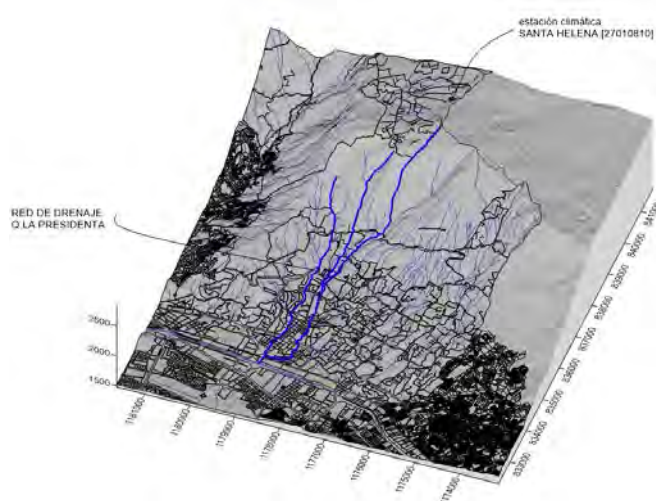


Figura 4. Red de drenaje quebrada la Presidenta

3.2.1 Código computacional test de Man-Kendal en R

En la Tabla 2, se presenta el código comentado para la implementación del test de Man-Kendal en R.

Tabla 2. Código Comentado para la implementación del test de Man-Kendal En R

Código	Comentario
archivo<- "C:/Users/USUARIO/Documents/INGENIO_2022/DATOS_IDEAM/PRECIPITACION.txt"	#se carga serie de precipitación máxima multianual
datos_p <-read.table(archivo,header=TRUE)	#Lectura de datos, en una tabla con encabezado.
ppmax_ <-ts(datos_p[,2])	# se indica que es una serie de tiempo
ts.plot(ppmax_)	#Se plotea la serie de precipitación mm vs tiempo año
mk.test(ppmax_)	#Test de ManKendall
	#cargar paquete Trend

3.2.2 Código computacional modelo valor extremo Gumbel estacionario en R

En la Tabla 3, se presenta el código comentado para la implementación Gumbel Estacionario en R.

Tabla 3. Código Comentado para la implementación Gumbel Estacionario En R

Código	Comentario
GUM0<-gum.fit(ppmax_)	#ACTIVAR ismvev
GUM0\$mle	#GUMBEL ESTACIONARIA
	#formato de salida
	#miu,alpha

3.2.3 Código computacional modelo valor extremo GEV estacionario en R

En la Tabla 4, se presenta el Código Comentado para la implementación Gev Estacionario en R.

Tabla 4. Código Comentado para la implementación Gev Estacionario En R

Código	Comentario
GEV0<-gev.fit(ppmax_)	#ACTIVAR ismvev
GEV0\$mle	#GEV ESTACIONARIO
	#formato de salida
	#miu,Alpha,k

3.2.4 Código computacional modelo valor extremo Gumbel no estacionario 1 en R

En la Tabla 5, se presenta el código comentado para la implementación Gumbel No Estacionario 1 en R.

Tabla 5. Código Comentado para la implementación Gumbel No Estacionario 1 En R

Código	Comentario
time<-matrix(1:51,ncol=1)	#ACTIVAR ismvev
GUM1<-gum.fit(ppmax_,ydat= time,mul=1)	#GUMBEL NO ESTACIONARIO ALPA (t) Y MIU
GUM1\$mle	#formato de salida
	#miu0, miu1,alpha

3.2.5 Código computacional modelo valor extremo GEV no estacionario 1 en R

En la Tabla 6, se presenta el Código Comentado para la implementación Gev No Estacionario 1 en R.

Tabla 6. Código Comentado para la implementación Gev No Estacionario 1 En R

Código	Comentario
GUM1<-gum.fit(ppmax_,ydat= time,mul=1)	#ACTIVAR ismvev
GUM1\$mle	#GUMBEL NO ESTACIONARIO ALPA (t) Y MIU
	#formato de salida
	#miu0, miu1,alpha0,k

3.2.6 Código computacional modelo valor extremo Gumbel no estacionario 2 en R

En la Tabla 7 se presenta el Código Comentado para la implementación Gumbel No Estacionario 2 en R.

Tabla 7. Código Comentado para la implementación Gumbel No Estacionario 2 En R

Código	Comentario
GUM2<-gum.fit(ppmax_,ydat=time,mul=1,sigl=1,siglink=exp)	#ACTIVAR ismvev
GUM2\$mle	#GUMBEL NO ESTACIONARIO ALPA (t) Y MIU (t)
	#formato de salida
	#miu0, miu1,alpha0, alpha1

3.2.7 Código computacional modelo valor extremo GEV no estacionario 2 en R

En la Tabla 8 se presenta el Código Comentado para la implementación Gev No Estacionario 2 en R.

Tabla 8. Código Comentado para la implementación Gev No Estacionario 2 En R

Código	Comentario
GEV2<-gev.fit(ppmax_,ydat=time,mul=1,sigl=1,siglink=exp)	#ACTIVAR ismvev
GEV2\$mle	#GUMBEL NO ESTACIONARIO ALPA (t) Y MIU (t)
	#formato de salida
	#miu0, miu1,alpha0, alpha1,K

3.2.8 Código computacional máxima verosimilitud en R

En la Tabla 9, se presenta el Código Comentado Máxima Verosimilitud en R.

Tabla 9. Código Comentado Máxima Verosimilitud En R

CODIGO	COMENTARIO
IM_0<- GUM0\$nlh	#OBTENER MAXIMA VEROSIMILITUD GUMBEL
IM_1<- GUM1\$nlh	
IM_2<- GUM2\$nlh	
IM_g0<- GEV0 \$nlh	#OBTENER MAXIMA VEROSIMILITUD GEV
IM_g1<- GEV1 \$nlh	
IM_g2<- GEV2 \$nlh	

4. RESULTADOS

Una vez realizados las respectivas modelaciones computacionales para verificar la estacionariedad o No estacionariedad de la precipitación máxima anual como detonante en el análisis multirisgo de inundación para la quebrada la Presidenta en el municipio de Medellín, los resultados se presentan en la Figura 5.

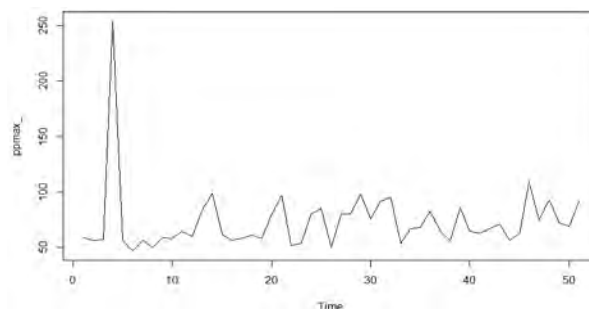


Figura 5. Resultado Gráfico de la multivalencia de la precipitación máxima en R

4.1 Resultado TesT de Man Kendal

Mann-Kendall trend test

data: ppmax_

z = 2,4977, n = 51, p-value = 0,0125

alternative hypothesis: true S is not equal to 0

sample estimates:

S varS tau

3,080000e+02 1,510800e+04 2,447568e-01

4.2 Resultados parámetros de localización, escala y forma

En la Tabla 10, se presentan los resultados del Modelo del Valor Extremo Computacional en R.

Tabla 10. Resultado del Modelo del Valor Extremo Computacional en R

	Parámetros de localización		Parámetros de escala		Parámetro de forma
	μ_0	μ_1	α_0	α_1	K
Gumbel Estacionario	63,88	14,3			
GEV estacionario	61,51	11,47			0,3214405
Gumbel no estacionario 1	56,13	0,3168778	13,34		
GEV no estacionario 1	55,12	0,2641649	10,4		0,3426392
Gumbel no estacionario 2	57,14	0,2738616	2,92	-0,01274789	
GEV no estacionario 2	49,17	0,7762707	1,13	0,1030348	0,3284563

4.3 Resultados parámetros de Máxima Verosimilitud en R

En la Tabla 11, se presentan los resultados del Modelo del Valor Extremo Máxima Verosimilitud en R.

Tabla 11. Resultado Del Modelo Del Valor Extremo Máxima Verosimilitud en R

	Gumbel		GEV	
LM_0	220,91	LM-G0	214,23	
LM_1	217,99	LM-G1	209,85	
LM_2	216,71	LM-G2	266,29	

4.4 Resultado de implementación del criterio AIC

En la Tabla 12, se presentan los resultados del modelo del valor extremo máxima verosimilitud en R.

Tabla 12. Resultado Del modelo del valor extremo máxima verosimilitud en R

ID	"-l(Θ_M)"	l(Θ_M)	Criterio K	2*K-2*l(Θ_M)	Categorización del menor
Estacionario_Gumbel	220,91	-220,91	2	445,82	434,46
Estacionario_GEV	214,23	-214,23	3	434,46	
No estacionario Gumbel 1	217,99	-217,99	2	439,98	425,7
No estacionario Gumbel 2	216,71	-216,71	2	437,42	
No estacionario GEV1	209,85	-209,85	3	425,7	
No estacionario GEV2	266,29	-266,29	3	538,58	

4.5 Resultados del modelo computacional de valor extremo implementado en R

En la Tabla 13, se presentan los resultados del modelo del valor extremo R.

Tabla 13. Resultado del modelo del valor extremo R

Serie de precipitación máxima estación Santa Helena [27010810]		Seria de precipitación modelo computacional valor extremo Gumbel estacionario	Seria de precipitación modelo computacional valor extremo GEV estacionario	t	Seria de precipitación modelo computacional valor extremo Gumbel no estacionario 1	Seria de precipitación modelo computacional valor extremo GEV no estacionario 1	Seria de precipitación modelo computacional valor extremo Gumbel no estacionario 2	Seria de precipitación modelo computacional valor extremo GEV no estacionario 2
t	PP [mm]	PP [mm]	PP [mm]	t	PP [mm]	PP [mm]	PP [mm]	PP [mm]
1	59	128,35	88,82	4	117,54	80,05	137,67	57,10
2	56	113,56	85,51	46	117,05	88,39	105,57	84,93
3	57	106,33	83,45	14	100,17	78,19	107,02	61,43
4	254	101,47	81,86	29	100,38	80,80	98,76	71,96
5	56	97,78	80,54	21	94,41	77,55	96,52	66,06
6	47	94,79	79,38	32	95,11	79,45	92,56	74,19
7	56	92,27	78,34	48	97,82	82,78	90,25	86,46
8	50	90,08	77,39	31	90,40	77,46	88,51	73,41
9	59	88,14	76,51	51	94,93	81,97	87,53	88,78
10	58	86,40	75,68	39	89,50	78,08	85,58	79,51
11	65	84,81	74,90	25	83,58	73,69	83,72	68,85
12	60	83,34	74,16	13	78,41	69,87	82,08	60,15
13	84	81,98	73,44	36	84,43	75,31	81,83	77,19
14	99	80,71	72,75	20	78,17	70,48	79,53	65,08
15	62	79,51	72,08	24	78,32	70,94	78,64	68,04
16	56	78,37	71,43	27	78,21	71,16	77,85	70,29
17	58	77,29	70,80	28	77,51	70,86	76,98	71,05
18	61	76,26	70,18	30	77,18	70,83	76,30	72,56
19	58	75,26	69,57	47	81,64	74,78	78,12	85,67
20	80	74,31	68,97	49	81,38	74,77	77,80	87,22
21	97	73,38	68,37	43	78,62	72,66	76,04	82,57
22	52	72,49	67,79	50	80,00	73,98	76,73	87,99
23	54	71,62	67,21	35	74,44	69,50	73,15	76,38
24	80	70,77	66,63	34	73,33	68,72	72,24	75,60
25	85	69,94	66,05	42	75,09	70,31	73,24	81,79
26	50	69,12	65,48	11	64,50	61,61	66,06	58,05
27	80	68,32	64,90	37	72,00	67,96	70,87	77,91
28	80	67,53	64,32	40	72,21	68,23	70,94	80,23
29	98	66,75	63,74	41	71,80	67,97	70,58	81,01
30	76	65,98	63,16	45	72,35	68,50	71,00	84,11
31	92	65,22	62,57	15	62,13	60,04	62,68	60,87
32	95	64,45	61,97	18	62,37	60,29	62,66	63,16
33	54	63,69	61,36	12	59,76	58,15	60,22	58,47
34	67	62,93	60,74	1	55,56	54,69	56,20	49,76
35	68	62,17	60,11	9	57,38	56,23	57,63	56,01
36	83	61,40	59,46	10	56,98	55,90	57,05	56,74
37	65	60,62	58,80	17	58,48	57,15	58,39	62,24

38	56	59,83	58,11	19	58,38	57,05	58,23	63,79
39	86	59,03	57,40	3	52,56	52,17	51,91	50,68
40	65	58,21	56,66	2	51,47	51,23	50,52	49,66
41	63	57,37	55,88	5	51,64	51,31	50,58	52,14
42	67	56,49	55,06	7	51,45	51,09	50,29	53,76
43	71	55,58	54,19	16	53,46	52,67	52,74	61,21
44	56	54,62	53,25	38	59,53	57,62	60,15	78,62
45	63	53,59	52,23	44	60,48	58,26	61,58	83,30
46	109	52,48	51,09	23	52,79	51,67	52,42	66,76
47	75	51,26	49,81	33	54,81	53,12	55,43	74,68
48	93	49,87	48,30	22	50,03	48,82	49,44	65,88
49	72	48,20	46,43	8	44,04	43,39	40,97	53,59
50	69	46,01	43,87	26	47,70	45,76	47,63	69,02
51	92	42,33	39,27	6	37,93	36,19	32,90	50,57

A continuación, en la Figura 6, se presenta la gráfica con los resultados finales del modelo computacional de precipitación máxima.

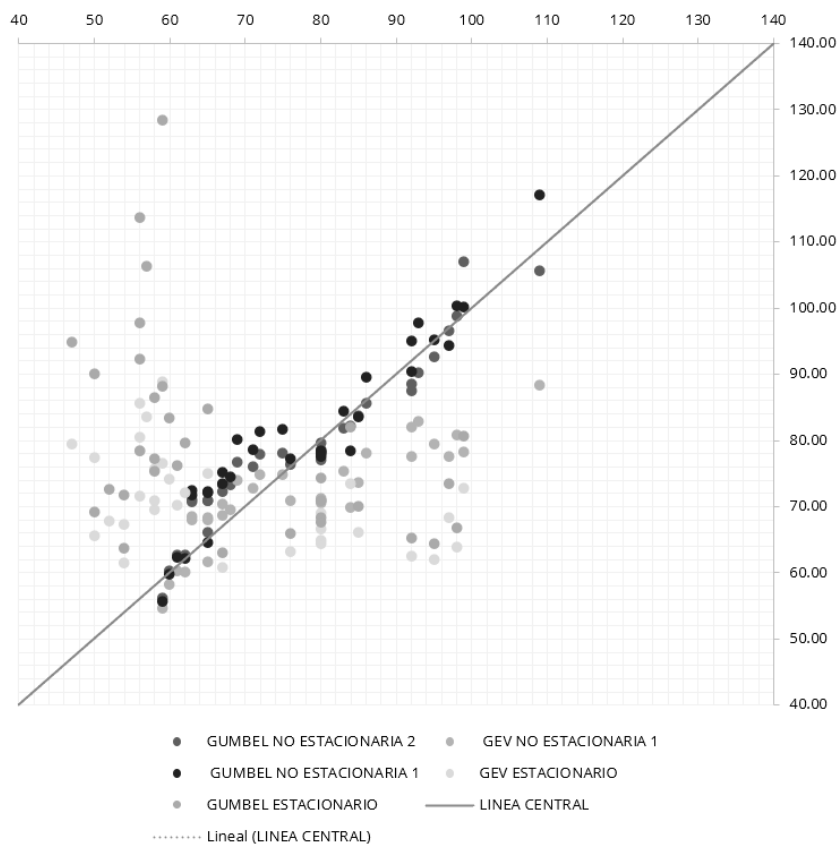


Figura 6. Gráfico Q_QPlot de los resultados finales del modelo computacional de precipitación máxima

5. DISCUSIÓN

En la obtención de los valores de precipitación máxima, considerando un enfoque de No Estacionariedad de la precipitación como detonante para modelación multiriesgo, es de vital importancia la calidad y cantidad de los datos disponibles, para el caso se utilizó datos de precipitación de la estación Santa Helena [27010810], dada su cercanía con la parte alta de quebrada la presidenta.

Como se pudo evidenciar en el desarrollo de la presente investigación, la precipitación aferente a dicha estación es de tipo Estacionario, no se evidencia mayor afectación y o no tendencia para el ajuste de los datos en función de la media y desviación estándar.

Al realizar el test de Man Kendal se obtiene un valor de p-value = 0,0125, análisis que se ve ratificado al obtener los resultados de la implementación del criterio AIC, en donde la variación en orden de magnitud

de la precipitación GEV-Estacionaria y GEV-Estacionaria1 con tendencia lineal en el parámetro de localización, presentan una diferencia de alrededor del 2,05%, algunas investigaciones recientes han logrado demostrar que para el valle del aburra existen registros con diferencia de al menos un 39% para periodos de retorno de 100 años [9].

6. CONCLUSIONES

Si bien en la presente investigación, no se alcanza a evidenciar una marcada tendencia a la No Estacionariedad de la precipitación y su correlación con las inundaciones periódicas de la quebrada la presidenta, es válido tener presente para futuros trabajos de investigación el considerar la incidencia de la precipitación en la zona de ladera o parte media de la cuenca, incluyendo como fuente de consulta datos de precipitación del SIATA con una mayor escala temporal. Así las cosas, como primera conclusión las causales del incremento de los caudales picos asociados a la mayor incidencia de la escorrentía superficial directa como en la incapacidad del cauce para asimilar el tránsito hidráulico de las crecientes en su parte baja, se asocia a variables de tipo hidrológico como lo es cambio de cobertura e impermeabilización acelerada de la cuenca de la quebrada la presidenta en su parte media

Si bien se aborda la precipitación como derivado de un modelo computacional de ajuste de máximos, queda pendiente para futuras investigaciones incluir los conceptos de intensidad, periodo de retorno y vida útil de las obras de drenaje presentes en la cuenca, considerando como referente metodológico [3].

La inclusión de herramientas computacionales en el análisis hidrológico y de gestión del riesgo, son de vital importancia, dado que facilitan el poder llegar a resultados concluyentes con pocas líneas de comando, en la presente investigación se comentan las líneas de código con la finalidad que el lector, se contextualice o familiarice con el mismo.

REFERENCIAS

- [1] Vargas M. y Diaz R. (2018). Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad- duración-frecuencia para Colombia. En XIII Semin. Nac. hidrológica e hidráulica.
- [2] Milly R. et al. (2008). Stationarity Is Dead. *Science* 319, 573–574.
- [3] Salas J. y Obeysekera J. (2014). Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. *J. Hydrol. Eng.* 19, 554–568.
- [4] Campos D. (2018). Ajuste con momentos L de las distribuciones GVE, LOG y PAG no estacionarias en su parámetro de ubicación, aplicado a datos hidrológicos extremos. *Agrociencia* 52, 169–189.
- [5] Ocampo A. (2019). Evaluación de no estacionariedad de series de tiempo hidroclimatológicas en Colombia: Caso aplicado al Eje Cafetero. Universidad de los Andes.
- [6] Periódico el Colombiano. (2017). Árboles caídos y vías inundadas por aguacero en Medellín. Recuperado : www.elcolombiano.com
- [7] Periódico el Mundo. (2018). Lluvias causan desbordamiento de quebrada La Presidenta en El Poblado. Recuperado: www.elmundo.com/noticia/Lluvias-causan-desbordamiento-de-quebrada-La-Presidenta-en-El-Poblado/371121
- [8] Periódico Minuto 30. (2022). De nuevo se desbordo la presidenta. Recuperado: twitter.com/minuto30com/status/1538284095746220036?ref_src=twsrc%5Etfw .
- [9] Grajales D. y Carvajal F. (2019). Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia no estacionarias para la cuenca del río Medellín. *Dyna* 86, 321–328.

Evaluación de umbrales críticos de precipitación como principal detonante de la amenaza por procesos de remoción en masa

María Alejandra Valencia Díaz¹
Carlos Andrés Ordoñez Ante²
Politécnico Jaime Izasa Cadavid
Colombia

En este capítulo se busca determinar los umbrales críticos de precipitación para el pronóstico de los movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia, mediante procedimiento empírico y teniendo en cuenta los datos meteorológicos de las estaciones pluviométricas y los registros históricos de movimientos en masa producidos por lluvias entre 1972 y 2021. Como producto se genera una proyección de ocurrencia de este fenómeno a causa de los eventos extremos de precipitación, como base para la evaluación del riesgo e implementación de sistemas de alerta temprana.

¹ Ingeniera Civil, Especialista en Geotecnia Ambiental y Estudiante de Maestría en Ingeniería.

Contacto: maría_valencia54212@elpoli.edu.co

² Ingeniero Geólogo, Especialista en Mecánica de suelos y cimentaciones, y Magíster en Ingeniería en Geotecnia.

Contacto: caordonez@elpoli.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de remoción en masa son detonados por factores antrópicos y naturales, causando afectaciones importantes principalmente en regiones montañosas tropicales las cuales son susceptibles a sufrir este tipo de fenómenos debido a sus características topográficas, geológicas, sísmicas, lluvias intensas [1], sumado a esto, la ocupación desordenada del territorio por el ser humano, la intervención de suelos con fines agrícolas en paisajes muy accidentados acelera los procesos convirtiéndolos en un peligro latente sin planes u obras de mitigación transformándolos en desastres [2].

En el Valle de Aburrá, los movimientos en masa han causado considerables pérdidas económicas y humanas. Debido a la ocupación de las laderas por asentamientos humanos, por obras de infraestructura y los eventos extremos de precipitación asociados al cambio climático, los riesgos asociados a los movimientos en masa se han incrementado en los últimos años.

Es por esto, que este trabajo pretende evaluar los umbrales críticos de precipitación como principal factor detonante de los fenómenos de remoción en masa en el Valle de Aburra.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Fenómenos de remoción en masa

Los fenómenos de remoción en masa se consideran procesos geomorfológicos en donde ocurren desplazamientos de roca, detritos o de tierras por efectos de la gravedad y diversos factores detonantes de origen natural como el clima, tectónica y la precipitación o de origen antrópico [3].

2.2 Talud

Un talud es una masa de suelo donde su superficie externa presenta una inclinación con respecto a la horizontal, cuando es conformado por procesos naturales es decir sin la intervención humana se le denomina ladera, mientras que si este es generado por la intervención humana mediante cortes o rellenos se define con el nombre de talud (Figura 1). La falla de un talud se puede producir por factores antrópicos o naturales que modifican su estado natural, entre los que se encuentran las variaciones en su topografía, eventos extremos de precipitación, eventos sísmicos, cambios en la resistencia del terreno, cambios en el uso de suelo, entre otros [4].

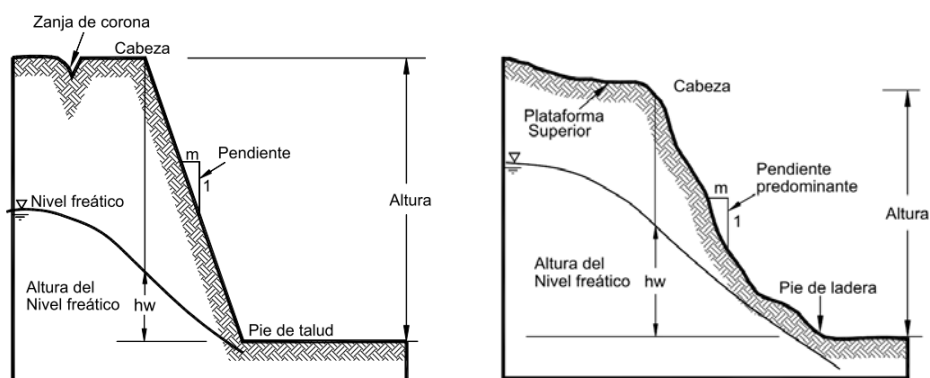


Figura 1. Partes que componen un talud o una ladera: a) Talud (conformado antrópicamente), y b) Ladera natural [9]

2.3 Tipos de movimientos en masa

Los Movimientos en masa se clasifican en: desprendimientos, Caídas de rocas, flujos, deslizamientos, volcamientos, propagación lateral, hundimientos, reptación, movimientos complejos, avenidas torrenciales y avalanchas, los cuales, pueden ser clasificados por su magnitud en relación con el volumen, actividad y velocidad e intensidad en los daños que ocasiona [5]. En la Tabla 1 se describen los principales tipos de movimientos en masa para suelos y roca según la clasificación de [6].

Tabla 1. Clasificación de movimientos en masa [6]

Tipo de movimiento	Tipo de material		
	Roca	Suelo	
		Grueso	Fino
Caída	De roca	De detritos	De tierra
Volcamiento	De roca	De detritos	De tierra
Deslizamiento	Rotacional	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos
	Traslacional	De bloques rocosos	De bloques de detritos
Propagación lateral	De roca	De detritos	De tierra
Flujos	De roca	De detritos	De tierra
Complejos: combinación de dos o más de los tipos principales de movimientos			

- *Desprendimientos o caídas:* son movimientos de materiales como rocas, detritos o suelos en caída libre a saltos o rodando, este se genera por el desprendimiento de material generalmente en una ladera o talud fuertemente inclinado, estos movimientos se definen de acuerdo al material involucrado, clasificándose en caída de rocas, caída de detritos o caída de suelos [7] (Figura 2) [4].

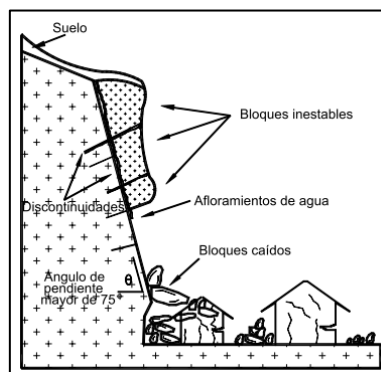


Figura 2. Caídos de bloques en caída libre de roca fracturada [9]

- *Volcamiento:* Este movimiento consiste en la rotación hacia delante de una masa de suelo, detritos o roca con un punto de giro en su parte inferior por la acción de la gravedad, normalmente ocurren en formaciones rocosas, suelos cohesivos secos y suelos residuales, este tipo de movimiento es generado por unidades adyacentes, agua en las grietas o movimientos sísmicos [4]. El volcamiento se presenta de tres tipos: Volcamiento a flexión, volcamiento en V invertida, flexión en bloque (Figura 3) [4].

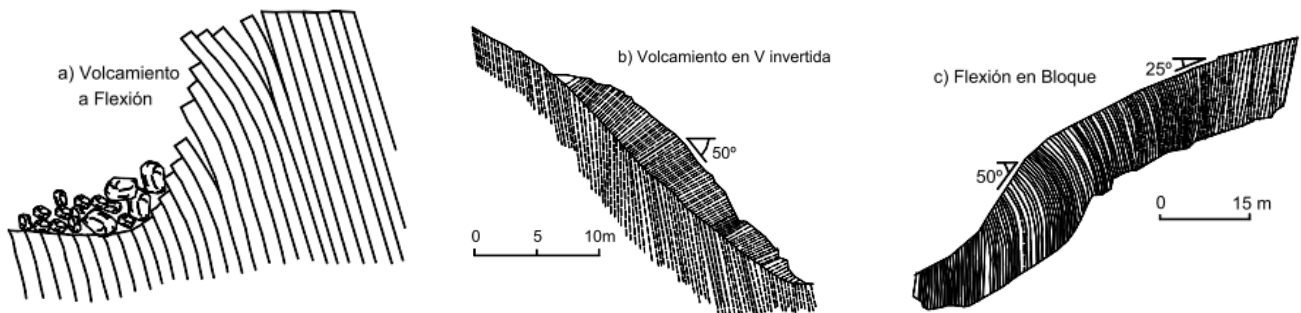


Figura 3. Tipos de Volcamiento [9]

- *Deslizamiento:* Un deslizamiento es un movimiento ladera abajo de una masa del suelo, detritos o roca sobre una o más superficies de rotura, generalmente forma grietas transversales localizadas en la zona que ocupara el escarpe principal [7]. Los deslizamientos son más frecuentes en laderas inclinadas entre 20° y 50° y con presencia de formaciones geológicas poco resistentes y cohesivas, también se presentan en laderas formadas por rocas estratificadas con capas delgadas de arcillas y en cortes antrópicos [8].

Los deslizamientos se presentan de dos tipos: tenemos rotacionales en los cuales la superficie de rotura es curva o cóncava y los traslacionales donde la superficie de rotura es semiplana u ondulada, son menos profundos que los rotacionales e involucran un movimiento paralelo a la superficie [7] (Figura 4) [4].

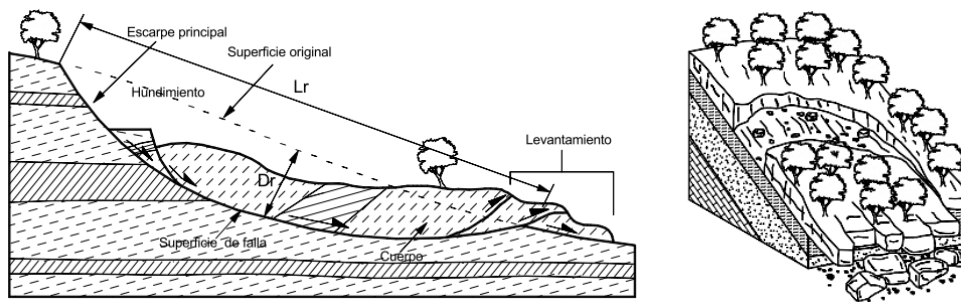


Figura 4. Tipos de deslizamiento [9]

- *Propagación lateral:* La propagación lateral es un movimiento en masa de suelo o roca que ocurre generalmente por la fracturación y expansión del material compacto por licuefacción del material subyacente [6] (Figura 5) [4].

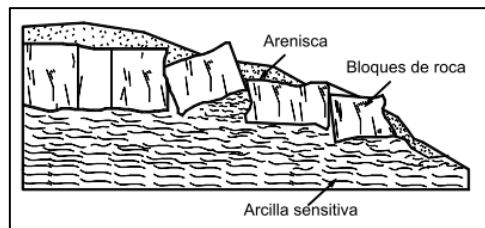


Figura 5. Extensión lateral [9]

- *Flujo:* Son movimientos espacialmente continuos en los que la superficie de cizalla son de corta duración y muy próximas, esto hace que no se observen fácilmente, además su distribución de velocidades no es homogénea y genera la formación de lóbulos a partir del movimiento intergranular lo que hace al movimiento parecido a la de un flujo viscoso, se clasifican de acuerdo al material que lo compone flujo de rocas, flujo de detritos o flujo de suelo [7], (Figura 6). Además, el flujo puede ser laminar o turbulento al aumentar la viscosidad y la velocidad [4].

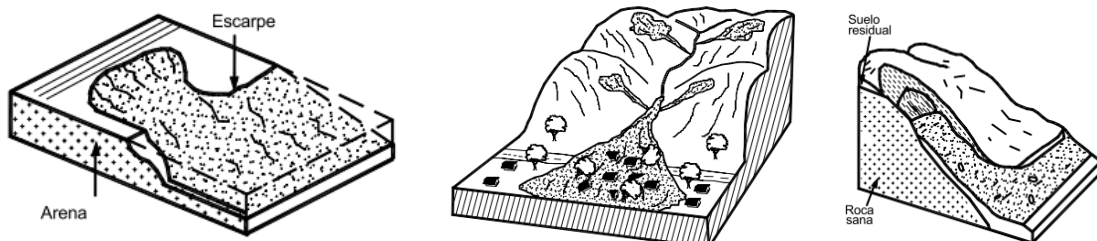


Figura 6. Esquemas de flujos [9]

2.4 Factores detonantes de movimientos en masa

Los movimientos en masa son detonados cuando se rompe la estabilidad natural de la ladera, mediante un conjunto de factores condicionantes los cuales se dividen en intrínsecos correspondientes a los factores propios de la ladera como las características topográficas y geológicas y externos como el clima de la región, la cobertura vegetal y uso del suelo [8], y factores detonantes causados por eventos naturales o por acciones antrópicas o la combinación de ambos factores [9].

- *Fenómenos naturales:* los eventos naturales que pueden generar movimientos en masa principalmente son: el agua, la actividad sísmica y la actividad volcánica, estos pueden ocurrir de forma individual o colectiva. La magnitud de los efectos ocasionados depende de características como la topografía del terreno, la morfología, la morfodinámica, el tipo de suelo la geología y los elementos que estén expuestos en las regiones afectadas [9].
- *Actividades humanas:* el desarrollo humano sobre laderas es la principal causa por la cual los seres humanos contribuyen a la ocurrencia de los movimientos en masa, otras acciones humanas que

producen deslizamientos son: la eliminación de cobertura vegetal, la sobrecarga de las construcciones sobre los taludes, los cambios de drenaje [9].

2.5 Amenaza

Peligro latente de que un evento de origen natural se presente con gran severidad, originado o provocado por las acciones humanas, causando pérdidas de vidas y lesiones, así como daños y pérdidas en la infraestructura, la prestación de servicios, los recursos ambientales, entre otros [3].

2.6 Vulnerabilidad

Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social y ambiental que tiene una comunidad de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente [3].

2.7 Riesgo

Pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a eventos físicos ya sean de origen natural o antrópico sin intención, en un periodo específico determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos [3], por ende, el riesgo es el resultado de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

2.8 Gestión del Riesgo de desastres

Es el proceso social de planificación, implementación, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para comprender los riesgos y promover una mayor conciencia de estos, prevenir y controlar el desarrollo de riesgos, manejar las situaciones de desastre, así como para la recuperación futura. Estas acciones tienen el objetivo explícito de contribuir a la seguridad humana, la felicidad, la calidad de vida y el desarrollo sostenible [10]. La gestión del riesgo de desastres se compone de tres procesos (Figura 7).



Figura 7. Proceso de la gestión del riesgo de desastres [11]

- Proceso de Conocimiento del Riesgo: Este proceso se compone por la identificación de escenarios de riesgo, el análisis y evaluación del riesgo, el monitoreo y seguimiento del riesgo y sus componentes y la comunicación para promover una mayor conciencia del mismo, que alimenta los procesos de reducción del riesgo y de manejo de desastre [11].
- Proceso de reducción del riesgo: Es el proceso compuesto por la mitigación del riesgo, la cual es la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes y la prevención del riesgo [11].
- Proceso de manejo de desastres: Es el proceso compuesto por la preparación y ejecución de la respuesta a emergencias y la recuperación después del desastre [11].

2.9 Clima

Condiciones atmosféricas que predominan durante un periodo específico sobre un lugar o una región, normalmente se cuantifica con el promedio de la temperatura, el acumulado de la precipitación o el número de fenómenos externos ocurridos en el periodo. Así, mismo el clima regula la distribución de las condiciones meteorológicas y los fenómenos atmosféricos extremos [12].

2.10 Precipitación

La precipitación consiste en la caída hasta la superficie de la tierra del agua de las nubes, ya sea en forma líquida o sólida [13]. La intensidad de la precipitación se define como la cantidad de agua que cae en la superficie durante un intervalo de tiempo determinado, se expresa de la siguiente forma [13]:

- Débil cuando la intensidad es menor a 2mm/h
- Moderada con intensidad entre 2 y 15 mm/h
- Fuerte de 15 a 30 mm/h
- Muy fuerte de 30 a 60 mm/h
- Torrenciales cuando son mayores a los 60 mm/h

2.11 Descripción del área de estudio

El Área metropolitana del Valle de Aburrá como región está conformada por diez municipios, de la siguiente manera, de sur a norte: Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí en el sur, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa en el norte. En una extensión de 1.165,5 kilómetros cuadrados, de los cuales el 15,2% corresponde a suelo urbano, según los Planes de Ordenamiento Territorial vigentes para cada municipio.

2.12 Características geográficas

El Valle de Aburrá está ubicado en el centro - sur del Departamento de Antioquia, en medio de la Cordillera Central de los Andes, es atravesado por el río Medellín - Aburrá - Porce (Figura 8), que recorre la subregión de norte a sur y se convierte en un eje estructurante importante de la zona que comprende una serie de municipios y de la estructura espacial urbano regional [14].

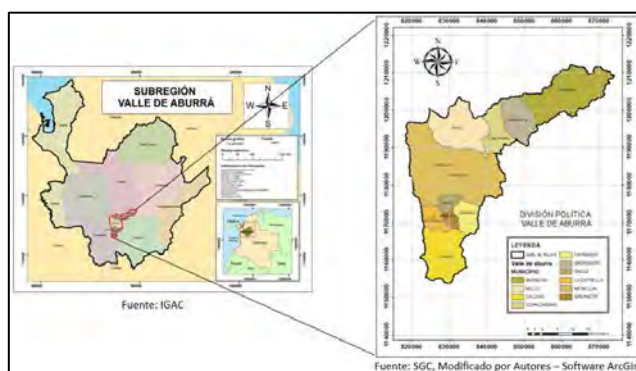


Figura 8. Geografía Antioquia - Valle de Aburrá

2.13 Población

De acuerdo con las proyecciones de población del DANE, en 2021 el Valle de Aburrá contaba con 4,1 millones de habitantes (60,6 % de la población de Antioquia), distribuidos como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Población Valle de Aburrá [15]

Valle de Aburrá	Extensión Km ²	Altitud m.s.n.m.	Población	Porcentaje
			4,182,607	%
Barbosa	206,00	1300	56,053	1,3%
Bello	142,36	1450	569,488	13,6%
Caldas	135,00	1750	86,042	2,1%
Copacabana	70,00	1454	84,389	2,0%
Envigado	78,78	1675	249,800	6,0%
Girardota	78,00	1425	56,148	1,3%
Itagüí	21,09	1550	299,098	7,2%
La Estrella	35,00	1775	77,888	1,9%
Medellín	380,64	1538	2,612,958	62,5%
Sabaneta	15,00	1150	90,743	2,2%

2.14 Topografía

El Valle tiene una longitud aproximada de 60 kilómetros y una amplitud variable. Está enmarcado por una topografía irregular y pendiente (Figuras 9 a 11), con alturas que oscilan entre 1300 y 2800 m.s.n.m.

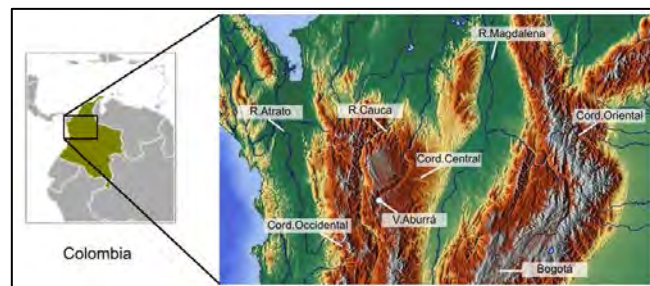


Figura 9. Topografía Valle de Aburrá [16]



Figura 10. Imagen satelital Valle de Aburrá 2021

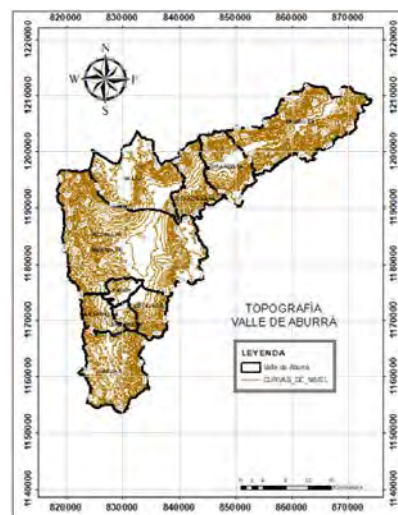


Figura 11. Topografía Valle de Aburrá

2.15 Clima del Valle de Aburrá

Las características geográficas y topográficas del Valle de Aburrá están asociadas a las condiciones hidrometeorológicas debido a que se ubica en la zona de convergencia intertropical definida por la convergencia de los vientos alisios, cuya posición oscila alrededor del Ecuador geográfico. El Valle de Aburrá es afectado a lo largo del año tanto por los vientos alisios del noreste como por los del sureste.

Además, el océano pacífico ejerce un efecto importante sobre la Hidroclimatología de Colombia en particular la región occidental y centro del país, debido principalmente a la acción de la corriente del Chorro del Choco, que transporta grandes cantidades de humedad desde el pacífico hacia el interior del país. El Chorro del Choco choca inicialmente contra el ramal occidental de la cordillera de los Andes y se encuentra

con los vientos alisios del este, en circunstancias que favorecen la convección profunda y la abundante precipitación sobre el occidente del país.

Las condiciones climáticas son típicas de ambientes tropicales húmedas, con una temperatura promedio de 22° C y humedad relativa del 70%. Las condiciones de lluvia son bimodales, con máximas de lluvia en los meses de mayo y octubre. Los promedios de lluvias anuales varían desde 1.400 mm en la parte central hasta los 2.700 mm en el norte y sur del valle [17] (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación climática entre los municipios que conforman el Valle de Aburrá [18]

	Copacabana	Barbosa	Girardota	Medellín	Bello
Precipitación (mm) Máxima	347	212,8	417	268	347
Precipitación (mm) Mínima	147	43,3	120	112	147
Mes más lluvioso	Abril	Octubre	Abril	Mayo	Abril
Mes menos lluvioso	Enero	Enero	Julio	Enero	Enero
	Sabaneta	Itagúí	La Estrella	Envigado	Caldas
Precipitación (mm) Máxima	347	269	272	268	355
Precipitación (mm) Mínima	147	118	124	117	126
Mes más lluvioso	Abril	Mayo	Mayo	Mayo	Mayo
Mes menos lluvioso	Enero	Enero	Enero	Enero	Enero

De acuerdo a lo anterior, los meses en los que se presenta la mayor cantidad de lluvia son abril y mayo, en nueve de los municipios el mes con menor cantidad de lluvia es enero a excepción de Girardota en el cual Julio es el mes más seco.

2.16 Tectónica

Colombia es un país de alta actividad sísmica debido a que se sitúa en la esquina Noroccidental de Suramérica donde se presenta la convergencia de tres placas: Nazca, Caribe y Suramericana, y dos micro placas: Panamá y el Bloque Andino [19]. El ambiente tectónico producto de la convergencia de placas, genera una estructura cortical con un complejo sistema de fallas regionales, en el departamento de Antioquia se encuentran dos grandes sistemas de fallas, donde el primer sistema lo conforman la zona de fallas Palestina y el segundo sistema corresponde a Cauca-Romeral [20].

El Valle de Aburrá se encuentra localizado sobre la Micro Placa del Bloque Andino en el extremo norte de la cordillera Central (Figura 12), clasificado como un área de amenaza sísmica intermedia en el reglamento colombiano de construcción Sismoresistente – NSR-10 [21], asociado a los sismos de intensidad baja o media, provenientes de las sismofuentes de Murindó, el Viejo Caldas, el Nido de Bucaramanga y el sistema de Fallas Romeral, el cual cruza el suroccidente del Valle [22].

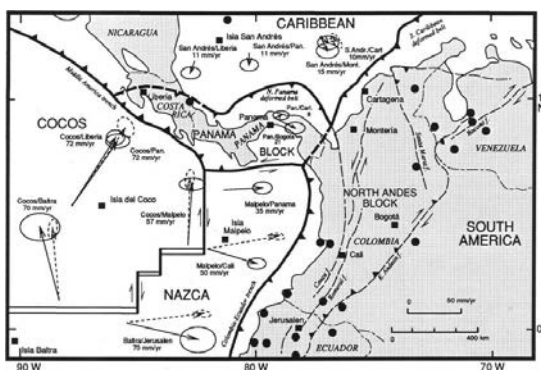


Figura 12. Esquema tectónico del Norte de los Andes [23]

2.17 Geomorfología

El Valle de Aburrá se localiza entre dos altiplanos sobre la cordillera central de los Andes [24], formando así una depresión cerrada con orientación sur-norte de fondo plano, al sur se va estrechando lo que se conoce como Ancón Sur, y al norte se estrecha en el municipio de Bello en la zona conocida como Niquia, limita

3. MÉTODO

3.1 Etapa I

Construcción de un registro histórico de las precipitaciones máximas a través de las bases de datos en los últimos 50 años de las estaciones pluviométricas existentes tanto activas como inactivas instaladas por el IDEAM y EPM en el Valle de Aburrá, con el fin de conocer el ciclo hidroclimatológico de la zona de estudio. En esta etapa se construyó la base de datos histórica de series de precipitación a partir de los registros obtenidos de la red pluviométrica de EPM conformada por 15 estaciones que hacen parte de la cuenca hidrográfica del río Aburrá – Medellín y la red pluviométrica del IDEAM de la cual se recolectaron datos de 13 estaciones para un total de 28 estaciones localizadas a lo largo del Valle de Aburrá. El registro de cada estación suministra información temporal (año, mes, día, hora, minuto), estos datos fueron depurados y organizados con el fin de obtener una base de datos condensada.

3.2 Etapa II

Elaboración de la base de datos de los movimientos en masa en el Valle de Aburrá, mediante fuentes como DesInventar y el servicio geológico colombiano para compararlos temporalmente y localmente con los eventos máximos de precipitación. Se construyó una base de datos de movimientos en masa ocurridos en el Valle de Aburrá con un histórico de 50 años a partir de los registros históricos obtenidos del sistema de información de movimientos en masa SIMMA, del Servicio Geológico Colombiano.

Para el caso de estudio se toman los datos en un periodo de 1972 – 2021 encontrando 2.824 registros por movimientos en masa. Esta base de datos se depuro teniendo en cuenta los siguientes criterios: eventos ocurridos en el periodo seleccionado, eventos que tienen como factor detonante la precipitación, eventos que se encuentren georreferenciados y contengan información temporal (fecha de ocurrencia). Aplicando estos criterios la base de datos se redujo a 92 movimientos en masa.

3.3 Etapa III

Definición de los umbrales críticos de precipitación mediante el análisis de los registros históricos recopilados, encontrando así el nivel máximo de precipitación como factor detonante de los movimientos en masa. Con base en las etapas I y II se georreferenciaron las 28 estaciones de pluviométricas (Figura 15) y se determinó el área de influencia de cada estación de lluvia, para esto se utilizó la aplicación ArcToolbox de ArcGis, por el método de las Isoyetas de interpolación, que es preciso y permite definir áreas de influencia en regiones montañosas, este trazado se basó en las curvas de igual precipitación (Figura 17).

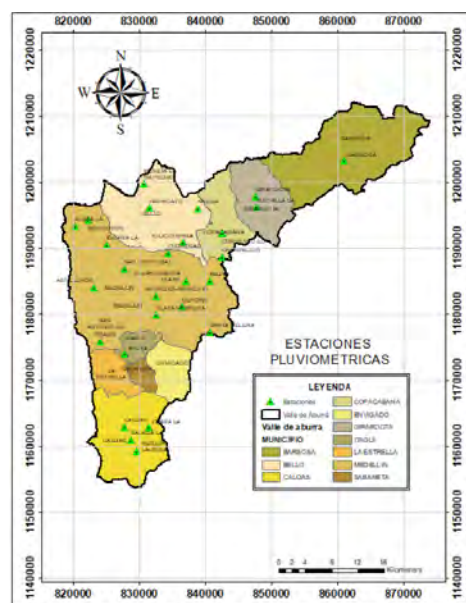


Figura 15. Georreferenciación de estaciones pluviométricas

A su vez, se georreferenciaron 93 movimientos en masa utilizando el aplicativo ArcMap de la herramienta ArcGIS (Figura 16), obteniendo una zonificación de los movimientos en masa asociados al área de influencia de cada estación pluviométrica como se muestra en la Figura 18, posteriormente mediante un procedimiento empírico se definen los umbrales críticos de precipitación que detonan movimientos en masa asignando una serie de precipitación histórica correspondiente a la estación de lluvia que comprendiera el área de influencia del lugar donde ocurrió el evento, finalmente se relaciona la lluvia acumulada a corto plazo (1, 3, 5 y 7 días) con la lluvia acumulada antecedente a largo plazo (5, 10, 15, 30, 60 y 90 días) para cada movimiento en masa.

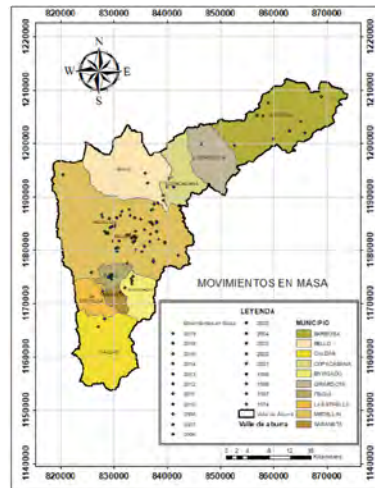


Figura 16. Georreferenciación de Movimientos en masa

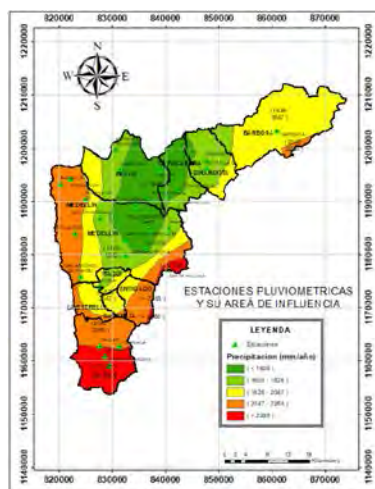


Figura 17. Área de Influencia de las estaciones pluviométricas

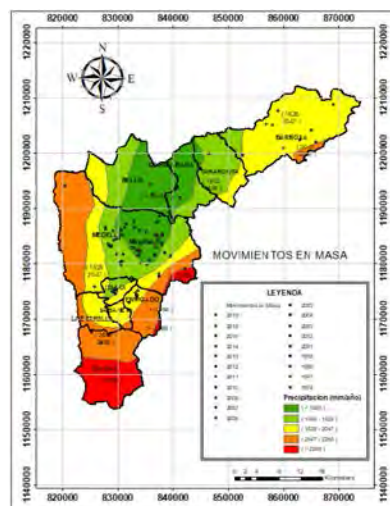


Figura 18. Concentración de los movimientos en masa asociados al área de influencia de las estaciones pluviométricas

4. RESULTADOS

4.1 Etapa I. Registro histórico de precipitaciones

En este capítulo se organizan y recopilan los registros históricos de precipitación en el Valle de Aburrá. La información recopilada de los registros históricos para las precipitaciones se obtuvo de las estaciones pluviométricas existentes tanto activas como inactivas instaladas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y Empresas Públicas de Medellín EPM, en el Valle de Aburrá. Se obtuvieron un total de 32 Estaciones, se descartaron 4 estaciones pluviométricas debido a la falta de datos, las estaciones se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Estaciones Pluviométricas

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Periodo	Faltantes (%)
27015170	Medellín	6.68333	-75.58333	2001 – 2021	0%
27010930	Ayurá	6.16667	-75.63333	2001 – 2021	0%
27010380	San Antonio de Prado	6.18333	-75.66667	2001 – 2021	0%
27010340	Mazo	6.26667	-75.51667	2001 – 2021	0%
27010450	Villahermosa	6.26667	-75.55000	2001 – 2021	0%
27010460	San Cristóbal	6.28333	-75.63333	2001 – 2021	0%
27010350	Chorrillos	6.30000	-75.50000	2001 – 2021	0%
27010360	Caldas	6.06667	-75.63333	2001 – 2021	0%
27011220	Convento El	6.33333	-75.50000	2001 – 2021	0%
27010370	Fabricato	6.36667	-75.60000	2001 – 2021	0%
27010760	Niquia	6.36667	-75.53333	2001 – 2021	0%
27010570	Barbosa	6.43333	-75.33333	2001 – 2021	0%
27015290	Pajarito	6.28633	-75.61279	2016 – 2020	33.4%
27015310	Metro Medellín	6.32975	-75.55211	2017 – 2021	59.8%
27015260	Salada La	6.04836	-75.62467	1984 – 2021	3.8%
27015160	Clara La	6.06667	-75.60000	1975 – 1977	13.79%
27010810	Santa Helena	6.19689	-75.51675	1970 – 2021	5.29%
27011110	Astilleros	6.25731	-75.67586	1991 – 2021	1.10%
27015270	Jardín Botánico	6.26692	-75.56317	2006 - 2007	56.7%
27011120	Iguana La	6.31628	-75.65753	1990 – 2021	2.85%
27015090	Tulio Ospina	6.31969	-75.55325	1972 – 2021	2.6%
26205080	Aldea La	6.34106	-75.70094	1990 – 2021	14.2%
27010820	Cuchilla La	6.36833	-75.45361	1970 – 2021	1.65%
27010780	Boquerón	6.35000	-75.68333	1970 – 1990	10.77%
27010800	Meseta la San Pedro	6.39972	-75.60722	1970 – 2021	4.84%
27010790	Meseta la Sena	6.03333	-75.61667	1970 – 1984	11.98%
27015120	Piedras Blancas	6.30000	-75.50000	1970 – 1981	30.0%
27011270	Laureles-Medellín	6.24642	-75.59106	2011 – 2021	4.43%
27015330	Olaya Herrera	6.22000	-75.59000	1971 – 2021	1.44%
2701056	Girardota	6.38268	-75.45414	2001 – 2021	0%
2701481	Pedregal	6.30492	-75.57449	2001 - 2021	0%
2701485	Gerona	6.23161	-75.55532	2001 - 2021	0%

4.2 Etapa II. Base de datos Movimientos en Masa

En la base de datos obtenida del sistema de información de movimientos en masa SIMMA del Servicio Geológico Colombiano (Figura 19), para los deslizamientos ocurridos en el Valle de Aburra en un histórico de 50 años que van desde 1972 a 2021 se tiene el registro de 2824 los cuales se redujeron a 92 teniendo en cuenta los criterios de depuración, posiblemente causados por lluvia, los cuales se georreferenciaron (latitud, longitud) y se clasificaron por año de ocurrencia, mediante la herramienta ArcGIS, estos deslizamientos en la mayoría de los casos implicaron pérdidas de vidas humanas, daños materiales o bloqueo de vías importantes.

De acuerdo con los datos recopilados en el año 2003 se presenta la mayor cantidad de registros seguido de los años 2013, 2006, 1998 correspondiente con los periodos en los cuales se presentó el fenómeno del niño en Colombia y el año 2011 con el fenómeno de la niña [28].

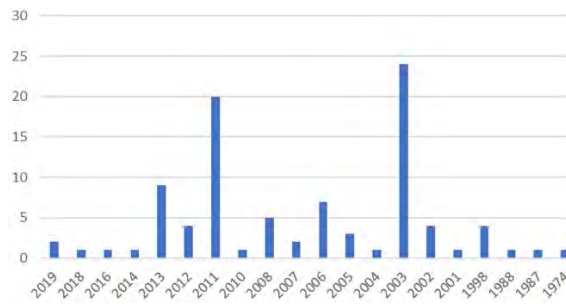


Figura 19. Registro histórico de Movimientos en Masa [27]

4.3 Etapa III. Cálculo de Umbrales críticos de precipitación

En el cálculo de los umbrales críticos de precipitación se asocian los movimientos en masa a una estación teniendo en cuenta su área de influencia determinada por el método de isoyetas con los parámetros de precipitación media anual (mm) del área de estudio, realizado para cada estación obteniendo como resultado la zonificación mostrada en la Figura 17.

5. DISCUSIÓN

Los resultados presentados en este capítulo, corresponden a los umbrales críticos de precipitación, los cuales se determinaron visualmente a partir de los patrones de dispersión obtenidos para las diferentes combinaciones de lluvia acumulada (1, 3, 5 y 7 días) y lluvia acumulada antecedente (5, 10, 15, 30, 60 y 90 días) de cada uno de los 92 movimientos en masa. Se representa la cantidad de lluvia caída tanto en las 24 horas del día de la ocurrencia del evento como los días inmediatamente anteriores – Lluvia a corto plazo en relación con la lluvia caída en los días precedentes al evento lo cual se conoce como lluvia a largo plazo.

En cada uno de los gráficos de dispersión mostrados en las Figuras 20 a 24 se trazaron los umbrales críticos de precipitación visualmente correspondiente a cada combinación de lluvia, la línea negra representa el umbral máximo bajo el cual ocurrieron la mayor cantidad de movimientos en masa y la línea roja el umbral mínimo sobre el cual comienzan a ocurrir la mayoría de los eventos, en las Tabla 5, 9, 10 y 11 se evidencian los porcentajes de los eventos que ocurren entre los umbrales máximos y mínimos de precipitación.

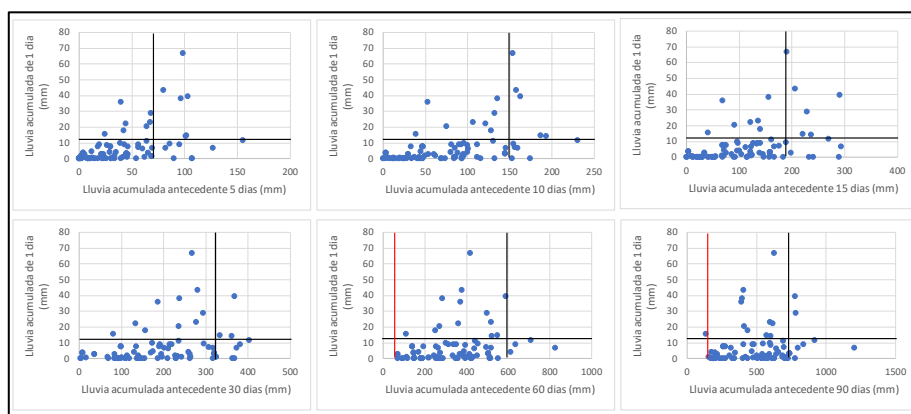


Figura 20. Lluvia acumulada de 1 día combinada con la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días

La lluvia acumulada a corto plazo de 1 día presenta un umbral máximo de 12 mm para todas las combinaciones de lluvia a largo plazo, mientras esta presenta una variación desde los 70 mm para la lluvia acumulada antecedente de 5 días incrementando hasta 750 mm para la lluvia acumulada antecedente de 90 días, a partir de los 60 días se alcanza a definir un umbral mínimo de precipitación para lluvia acumulada antecedente de 50 mm incrementando hasta los 150 mm para los 90 días.

Se observa que en todas las combinaciones de lluvia la dispersión tiende a incrementar en el largo plazo, moviéndose la concentración de puntos en sentido positivo del eje de las abscisas esto se debe a que, al aumentar los días de lluvia acumulada antecedente, aumenta también la cantidad de lluvia en el talud.

Tabla 5. Umbrales críticos de precipitación para la lluvia acumulada de 1 día combinada con la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días

Datos	%	Umbrales críticos		
		Lluvia acumulada		
		(mm)	Antecedente (mm) mínimo	Antecedente (mm) máximo
71	77,17%	12	0	70
73	79,35%	12	0	150
73	79,35%	12	0	190
73	79,35%	12	0	350
75	81,52%	12	50	600
74	80,43%	12	150	750

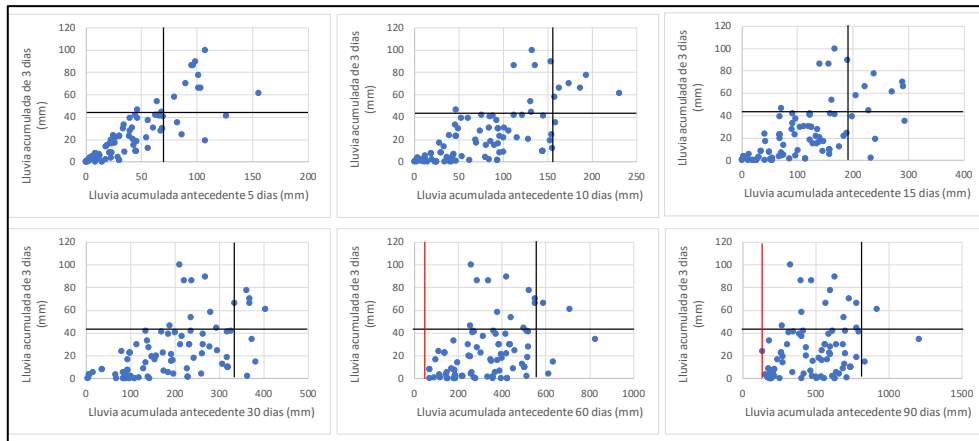


Figura 21. Lluvia acumulada de 3 día combinada con la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días

Tabla 6. Umbrales críticos de precipitación para la lluvia acumulada de 3 día combinada con la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días

Datos	%	Umbrales críticos		
		Lluvia acumulada		
		(mm)	Antecedente (mm) mínimo	Antecedente (mm) máximo
76	82,61%	45	0	70
80	86,96%	45	0	160
75	81,52%	45	0	190
77	83,70%	45	0	340
77	83,70%	45	50	550
77	83,70%	45	150	800

La lluvia acumulada a corto plazo de 3 día presenta un umbral máximo de 45 mm para todas las combinaciones de lluvia a largo plazo, mientras esta presenta una variación desde los 70 mm para la lluvia acumulada antecedente de 5 días incrementando hasta 800 mm para la lluvia acumulada antecedente de 90 días, a partir de los 60 días se alcanza a definir un umbral mínimo de precipitación para lluvia acumulada antecedente de 50 mm incrementando hasta los 150 mm para los 90 días.

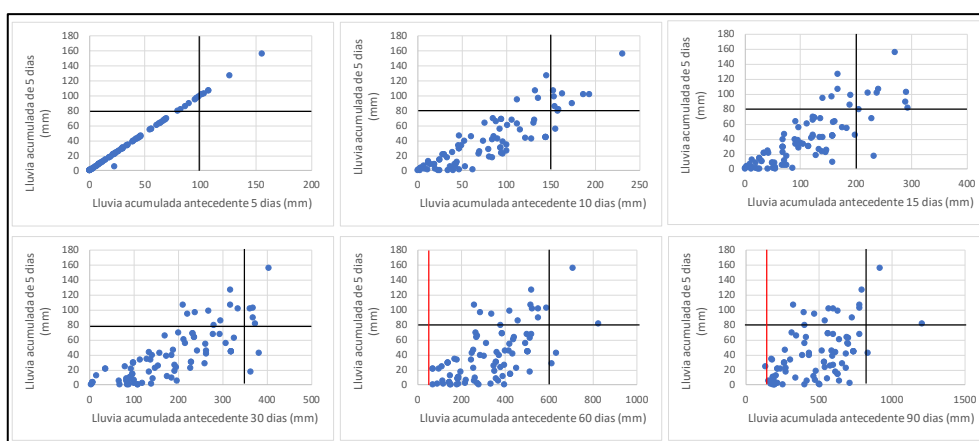


Figura 22. Lluvia acumulada de 5 día combinada con la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días

Tabla 7. Umbrales críticos de precipitación para la lluvia acumulada de 5 día combinada con la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días

Datos	%	Umbrales críticos		
		Lluvia acumulada		
		(mm)	Antecedente (mm) mínimo	Antecedente (mm) máximo
79	85,87%	80	0	100
77	83,70%	80	0	150
76	82,61%	80	0	200
77	83,70%	80	0	350
77	83,70%	80	60	600
78	84,78%	80	150	850

La lluvia acumulada a corto plazo de 5 día presenta un umbral máximo de 80 mm para todas las combinaciones de lluvia a largo plazo, mientras esta presenta una variación desde los 100 mm para la lluvia acumulada antecedente de 5 días incrementando hasta 850 mm para la lluvia acumulada antecedente de 90 días, a partir de los 60 días se alcanza a definir un umbral mínimo de precipitación para lluvia acumulada antecedente de 50 mm incrementando hasta los 150 mm para los 90 días.

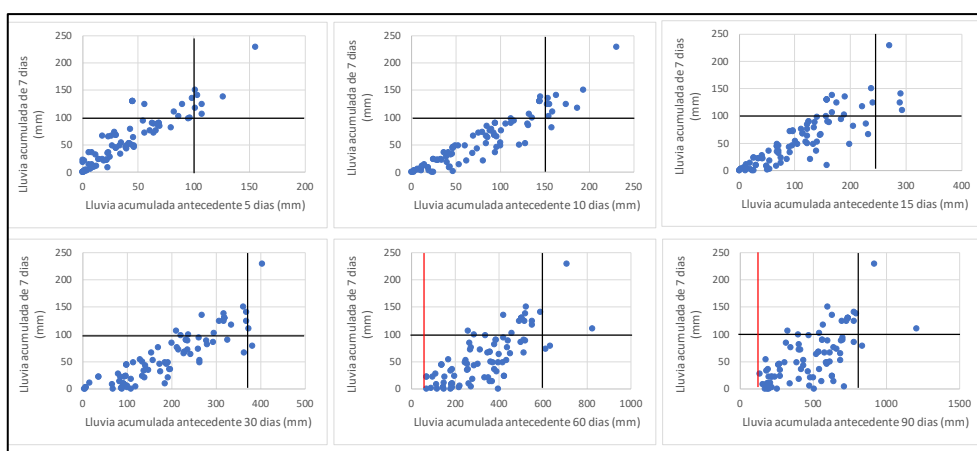


Figura 23. Lluvia acumulada de 7 día combinada con la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días

Tabla 8. Umbrales críticos de precipitación para la lluvia acumulada de 7 día combinada con la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días

Datos	%	Umbrales críticos		
		Lluvia acumulada		
		(mm)	Antecedente (mm) mínimo	Antecedente (mm) máximo
76	82,61%	100	0	100
75	81,52%	100	0	150
76	82,61%	100	0	250
75	81,52%	100	0	380
74	80,43%	100	60	600
75	81,52%	100	150	850

La lluvia acumulada a corto plazo de 7 día presenta un umbral máximo de 100 mm para todas las combinaciones de lluvia a largo plazo, mientras esta presenta una variación desde los 100 mm para la lluvia acumulada antecedente de 5 días incrementando hasta 850 mm para la lluvia acumulada antecedente de 90 días, a partir de los 60 días se alcanza a definir un umbral mínimo de precipitación para lluvia acumulada antecedente de 60 mm incrementando hasta los 150 mm para los 90 días.

6. CONCLUSIONES

Los resultados presentados en esta investigación corresponden a los umbrales críticos de precipitación, los cuales, en todas las combinaciones de lluvia mencionadas en la etapa 3, la dispersión tiende a incrementar en el largo plazo, moviéndose la concentración de puntos en sentido positivo del eje de las abscisas esto se debe a que, al aumentar los días de lluvia acumulada antecedente, aumenta también la cantidad de lluvia que cae en el talud.

Los datos calculados pueden proponerse como nuevos umbrales críticos de precipitación que detonan movimientos en masa en el Valle de Aburrá, continuando el trabajo realizado por Aristizábal y otros en el año 2011 [29].

Un refinamiento de esta metodología y una proyección futura de las precipitaciones podrían conducir a la construcción de un sistema de alerta temprana en las zonas más críticas del Valle de Aburrá, mediante la zonificación con sistemas de información geográfica con el fin de tomar decisiones y evitar pérdidas humanas y materiales.

Este proyecto de investigación es una base para un trabajo posterior el cual consiste en la zonificación de la amenaza por procesos de remoción en masa detonados por lluvias, mediante uso de redes neuronales para predecir precipitaciones máximas asociadas a la variabilidad climática en los próximos 20 años, como instrumento base para la evaluación del riesgo de este fenómeno en el Valle de Aburrá.

7. REFERENCIAS

- [1] Ramos C. et al. (2015). Analisis descriptivos de procesos de remocion en masa en Bogotá. Obras y Proyectos 63-75.
- [2] Acosta I. (2014). Impacto del cambio climatico en la remocion en masa del municipio de Villavicencio. Cap&Cua Ciencia, Tecnología y Cultura.
- [3] Servicio Geológico Colombiano. (2016). Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Imprenta Nacional de Colombia.
- [4] Suarez J. (2009). Deslizamientos: Analisis Geotecnico Tomo 1. Universidad Industrial de Santander UIS.
- [5] Vargas G. (2000). Criterios para la clasificacion y descripcion de movimientos en masa. Boletin de Geologia 22(37), 39-67.
- [6] Varnes D. (1978). Landslides, analysis and control. National Academy of Sciences.
- [7] Alcantara I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Boletin del Instituto de Geografia 77-95.
- [8] Copons R. y Tallada A. (2009). Movimientos de Ladera. Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra 284-294.
- [9] Highland L. y Bobrowsky P. (2008). Manual de derrumbes: Una guia para entender todo sobre derrumbes. Circular 1325, 4-39.
- [10] Arévalo D. y Parias J. (2013). Análisis de la amenaza por fenómenos de remoción en masa en la región del Boquerón ubicada entre los departamentos de Cundinamarca y Tolima mediante el uso de un sistema de información geográfica de libre distribución. Trabajo de Grado.
- [11] UNGRD. (2015). Guía de Integración de la Gestión del Riesgo y el Ordenamiento Territorial Municipal. Bogotá.
- [12] IDEAM y UNAL. (2018). Variabilidad climática y cambio climático en colombia. Bogotá.
- [13] Nuñez S. (2020). Ecologia Verde. Recuperado: <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-precipitaciones-3086.html>
- [14] Universidad de Antioquia. (2021). Perfil de Desarrollo Subregional - Subregión Valle de Aburrá de Antioquia. Medellín.
- [15] DANE. (2020). Proyecciones de población con base en el Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Bogotá.
- [16] Jimenez J. (2016). Altura de la Capa de Mezcla en un área urbana, montañosa y tropical. Caso de estudio: Valle de Aburrá (Colombia). Recuperado: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-4-Mapa-topografico-de-Colombia-y-Antioquia_fig1_322551761
- [17] Guerrero L. y Aristizabal E. (2019). Estimación y análisis de umbrales críticos de lluvia para la ocurrencia de avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá. Revista EIA 97-111.
- [18] Cedar Lake Ventures Inc. (2018). weatherspark.com. Recuerado: <https://es.weatherspark.com/>
- [19] Taboada A. et al. (2000). Geodynamics in northern Andes: Subductions and intracontinental deformations (Colombia). Tectonics V19, 787-813.
- [20] INGEOMINAS. (2001). Base de datos de fallas activas de Colombia. Bogotá.
- [21] Asociacion Colombiana de Ingenieria Sísmica. (2010). Reglamento de Construccion Sismoresistente - NSR 10. Bogotá.
- [22] Consorcio Microzonificacion. (2006). Microzonificacion sismica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Medellín.
- [23] Kellogg J. y Vega V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica and the Colombian Andes: Constraints from global positioning system geodetic studies and gravity. Geological Society of America Special Paper 295, 75-91.
- [24] Aristizabal E. et al. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. TecnoLógicas 22 (46), 39-60.

- [25] Arias L. y Gonzalez L. H. (2003). La diversidad del relieve y los suelos en el altiplano de Santa Rosa de Osos (Antioquia): sus significados ambientales. Boletín de ciencias de la tierra.
- [26] Aristizabal E. y Yokota S. (2008). Evolución geomorfológica del Valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. Boletín ciencias de la tierra 5-18.
- [27] Servicio Geológico Colombiano. (2022). SIMMA. Recuperado: <https://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>
- [28] UNGRD. (2016). Fenómeno El Niño. Oficina asesora de comunicaciones.
- [29] Aristizabal E. et al. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. Escuela de Ingeniería de Antioquia 95 - 111.

Proceso de soldadura por arco sumergido de biseles estrechos utilizando un electrodo de cinta metálica de sección rectangular

Ronan Lázaro da Silva Costa¹

Ariel Rodríguez Arias²

Eduardo José Sánchez Lobo³

Universidade Federal de Minas Gerais
Brasil

Las exigencias de la industria y la demanda de procesos más eficientes han obligado a los investigadores a buscar nuevos procesos de soldadura para aumentar la productividad de las piezas unidas, sin sacrificar la calidad y buscando disminuir los costos de producción. En este trabajo se presenta una nueva técnica de soldadura en chaflán estrecho, con la diferencia de que utiliza un consumible de cinta metálica o de área rectangular. Para la aplicación de este proceso se vio la necesidad de diseñar y construir una antorcha especial o cabezal de soldadura que utiliza cintas metálicas como metal de aporte que, posteriormente, se acopló a una fuente de soldadura utilizada para arco sumergido SAW, disponible en el laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación LRSS de la Universidad Federal de Minas Gerais UFMG de Brasil.

¹ Estudiante de Maestría en Ingeniería mecánica.

Contacto: ronanlazar@yahoo.com.br

² Doctor en Ingeniería mecánica.

Contacto: arielra@demec.ufmg.br

³ Estudiante de Maestría en Ingeniería mecánica.

Contacto: ejsanchezl@ufps.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El arco es una descarga eléctrica que suele oscilar entre 1 y 2000 Amperios cuando se aplica a la soldadura[1]. Hay una gran variedad de procesos de soldadura, entre ellos el proceso de arco sumergido. Generalmente, estos procesos utilizan uno o más hilos circulares o tiras metálicas.

En la literatura, solo se encontró el uso de cintas rectangulares para el recubrimiento de la superficie o revestimiento duro buscando un recubrimiento de un metal de adición con características especiales resistentes al desgaste, resistentes a la corrosión y a las altas temperaturas en la superficie de trabajo principalmente en las industrias del acero, la minería y la industria petrolera [2].

Como ya se ha descrito por su nombre, en el proceso de soldadura por arco sumergido, el arco está protegido por una capa de fundente que lo protege, además de proteger el metal base fundido y el charco de fusión [3], por esta razón, es difícil visualizar la transferencia metálica [4].

La soldadura en bisel estrecho es una técnica desarrollada para soldar chapas gruesas de forma más económica. Por lo general, se utilizan biseles de hasta un máximo de 20°, ya que estos requieren menos soldadura y menos tiempo de soldadura. En la soldadura de estos biseles se están aplicando varias técnicas, como la soldadura de arco sumergido SWAW, la soldadura de metal protegido por gas MIG/MAG, GMAW y la soldadura de gas inerte de tungsteno TIG, GTAW [5].

Para aumentar aún más la tasa de deposición y reducir el tiempo de soldadura, en este trabajo, para soldar biseles estrechos, se utilizó una tira de metal con sección transversal rectangular como metal de aportación. La Figura 1 muestra el posicionamiento de la banda en relación con el chaflán.



Figura 1. Posición de la cinta en el chaflán

2. MÉTODO

La metodología es presentada con una breve información de los componentes del proceso de soldadura y su principal función, además de seguir un paso a paso de las etapas desarrolladas para obtener resultados y analizarlos de la manera más clara y eficiente.

2.1 Máquina de soldar

Para la realización de las pruebas se utilizó una máquina de soldadura por arco sumergido, fabricada por White Martins, modelo V-800 mostrada en la Figura 2. Esta máquina está compuesta por una fuente de tensión constante de tipo transformador-rectificador, con una tensión de alimentación de 220/380/440V, un factor de potencia de 0,98, una capacidad de corriente de 800A y una tensión máxima de 43V [6]. Conectado a esta fuente se utilizó una unidad de control Unionmelt CAS-100, que permite controlar la corriente y la velocidad de soldadura.

2.2 Fabricación del cabezal de soldadura

La máquina de soldar fue diseñada para trabajar con alambres circulares, lo que hizo necesaria la construcción de un cabezal para soldar con cintas de sección rectangular. El cabezal fabricado está

compuesto por 2 (dos) rodillos, uno motorizado y el otro accionado, protegido por una caja metálica, aislada eléctricamente de la carcasa de la máquina. En esta caja se encuentra la primera parte de la pinza de contacto, compuesta por placas de acero al carbono y cobre. La segunda parte del agarre de contacto es simétrica en con respecto a la primera. Las garras se fijan mediante tornillos y muelles, que facilitan el ajuste entre el electrodo de cinta y las garras. El electrodo de la banda pasa entre los rodillos, correctamente ajustados, para suministrar una alimentación continua, y se dirige hacia las mordazas de contacto, que tocan la banda mediante el ajuste realizado con tornillos y muelles. La Figura 3 muestra el diseño del cabezal de soldadura fabricado y adaptado a la unidad de control.



Figura 2. máquina de soldadura por arco sumergido



Figura 3. Cabezal de soldadura adaptado a la unidad de control CAS-100.

2.3 Ajuste eléctrico

La fuente de soldadura utilizada en este trabajo es una fuente de tensión constante, y la alimentación de metal de adición viene dada por el ajuste de la corriente, no siendo posible ajustar las dos magnitudes por separado. Esta funcionalidad hace imposible soldar con tiras de metal, ya que la máquina de soldar, V-800, fue diseñada para trabajar con alambre circular. Sin embargo, el motor encargado de alimentar el metal de adición es una máquina de corriente continua compuesta (excitación en serie y en paralelo) y su alimentación se realiza de forma independiente por fuentes internas (V_{dc1} y V_{dc2}).

Por lo tanto, mediante la inserción de una resistencia variable, es posible atenuar el par, ya que la corriente del inducido se atenúa y, en consecuencia, mediante la caída de tensión en los bornes, es posible controlar la velocidad de la máquina y la velocidad del avance del metal de adición. La Figura 4 muestra el diagrama de cableado después de insertar el reóstato mostrado en la Figura 5.

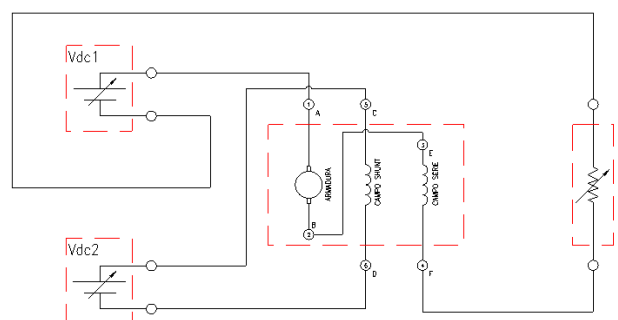


Figura 4. Adaptación eléctrica con la inserción de un reóstato



Figura 5. Reóstato

2.4 Velocidad de alimentación del metal depositado

Como ya se mencionó en el ajuste eléctrico el motor encargado de alimentar el metal de adición es una máquina de corriente continua compuesta (excitación en serie y en paralelo) y su alimentación se realiza de forma independiente por fuentes internas (Vdc 1 y Vdc 2). Además, en el motor de corriente continua, la variación del conjugado se refleja directamente en la corriente del inducido, según la ecuación (1).

$$T = N \times \varphi p \times I_a \quad (1)$$

Donde:

T = Par o conjugado mecánico;

N = Constante constructiva de la máquina;

φ = Flujo polar teórico;

I_a = Corriente de armadura.

Además, en las máquinas de corriente continua, la velocidad desarrollada por el inducido es proporcional a la tensión de velocidad (fracción de la tensión en bornes que es inducida por el movimiento de los conductores en el flujo polar), lo que puede verse en la ecuación (2).

$$V_{ind} = \frac{W}{\varphi p} * N \quad (2)$$

Donde: W = Velocidad desarrollada por el inducido, y V_{ind} = Tensión de velocidad.

2.5 Electrodo metálicos

Para fabricar los electrodos se utilizó una chapa de acero ASTM A-36 de 0,75 mm de espesor y 15 mm de ancho, cuya composición es mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del electrodo la cinta metálica.

Fe	C	Mn	P	S	Si	Cu
98,54	0,28	Max. 0,90	Max. 0,04	Max.0,05	Max. 0,04	0,2

2.6 Cuerpos de prueba

Para la fabricación de la muestra se fresó una ranura de 8 mm de ancho, 10 mm de profundidad y 200 mm de longitud, según la Figura 6.



Figura 6. Cuerpo de Prueba

El material utilizado es una aleación de acero con composición química como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química do metal de base

Elemento	Fe	Mn	Si	C	Cu	V	Nb	Ni	Cr	Mo	P	Al	Ti	S	Co
(%)	98,06	1,45	0,23	0,09	0,08	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005	0,05

Para verificar la soldabilidad del acero API 5LX70, el carbono equivalente se calculó con la ecuación (3).

$$Ceq = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5} + \frac{\%N+\%Cu}{15} \quad (3)$$

El valor hallado al aplicar esta ecuación es de 0,35%, lo que indica que este acero tiene una buena soldabilidad [7].

2.7 Dirección de la soldadura

Para la realización de la soldadura, se inclinó el cabezal en relación al metal base, haciendo que la distancia entre los extremos de la tira y el charco de fusión se mantuviera igual. Además, esta inclinación hacía que parte del electrodo hiciera el pase de la raíz y el resto llenara completamente la junta, de forma gradual, pero en una sola pasada. La Figura 7 muestra de forma esquemática cómo se realiza la deposición del metal de relleno.

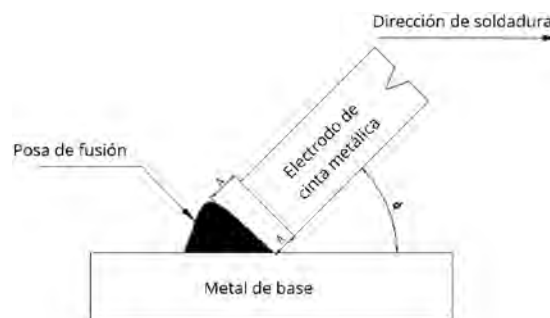


Figura 7. Dirección de la soldadura

2.8 Parámetros de soldadura

Se realizaron tres soldaduras con diferentes parámetros, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de la prueba

Prueba	1	2	3
Tensión (V)	17	17	17
Corriente (A)	280	240	200
Stick-aut (mm)	60	60	60
Velocidad de Soldadura (mm/s)	3,9	2,2	1,3
velocidad de alimentación (mm/s)	21,5	18,9	14,4
inclinación (°)	12	12	12

2.9 Adquisición de señales

Para entender la transferencia de metal en el proceso de soldadura de chaflanes estrechos utilizando un electrodo de cinta, se midieron las señales de tensión y corriente. Para ello se utilizó un sistema de adquisición, modelo SAP V4, cuyo fabricante es la empresa IMC SOLDAGEM, que tiene una capacidad de adquisición de 5000 puntos por segundo.

Para la adquisición de las señales de tensión, se instaló un sensor de tensión en paralelo con la fuente de la máquina de soldar, y para las señales de corriente, se instaló un sensor Hall en serie con la misma fuente. La Figura 8 muestra el dibujo esquemático de la conexión del sistema de adquisición de señales.

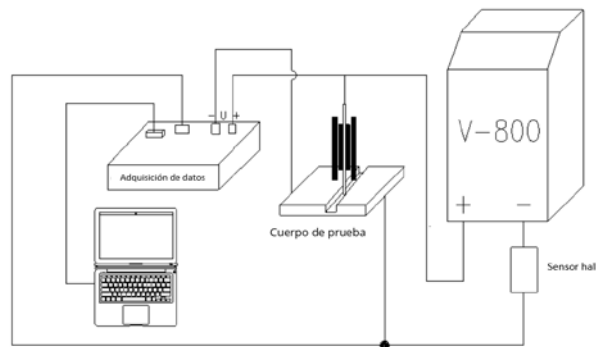


Figura 8. Adquisición de la señal

Para el procesamiento de las señales eléctricas colectadas se utilizó el software SINAL, desarrollado por la UNIVERSIDAD FEDERAL DE MINAS GERAIS, BRASIL, el cual mide en un cierto periodo de tiempo señales eléctricas como tensión, corriente, potencia, tensión de arco en abierto, y frecuencias de corto circuito, además de generar gráficos que facilitan el análisis de los resultados.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Todas las pruebas se realizaron con el mismo valor de tensión y stick-out (Distancia entre el contacto energizado al metal base). La Figura 9 representa el comportamiento de la tensión en función del número de puntos para las muestras 1, 2 y 3. En esta gráfica se puede ver que no hay puntos de cortocircuito en ninguna de las tres pruebas y tampoco hay puntos de extinción de arco, porque no hay curvas a la derecha y a la izquierda de la curva que representa el arco abierto (curva con pico a 32V).

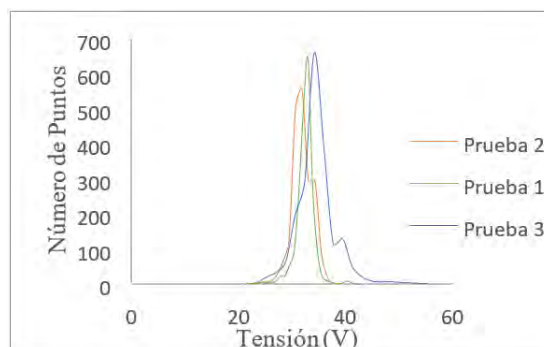


Figura 9. Histograma de Tensión - Prueba 1, 2 y 3

Según [8], se puede evaluar la estabilidad de un proceso por la curva generada en un histograma de tensión, onde las curvas o picos con una abertura de base menor y un pico de puntos más alto se caracteriza como el proceso más estable. Todavía es posible ver que la curva relativa a la prueba 1 representa los parámetros que dieron mayor estabilidad al proceso, ya que la distribución de la tensión estaba más concentrada en esta curva. La Figura 10 muestra las señales de tensión y corriente recogidas para la muestra 1; la Figura 11 para la muestra 2 y la Figura 12 para la muestra 3. Los datos se recogieron tras 5 segundos de apertura del arco y se muestran en el periodo de 200 ms.

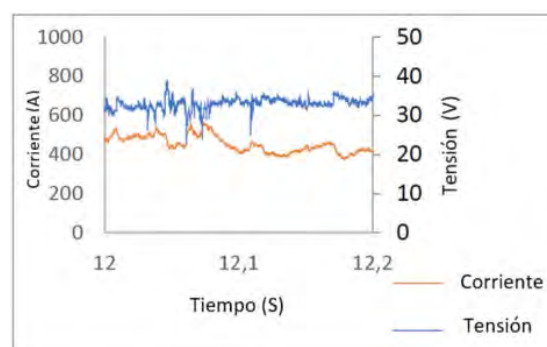


Figura 10. Tensión, corriente x tiempo - Prueba 1

La Figura 10 permite identificar que las líneas de tensión y corriente no sufren perturbaciones bruscas y se mantienen con una cantidad de picos insignificantes para el proceso lo que se traduce a un proceso estable.

En la Figura 11 se puede evidenciar picos altos y bajos de corriente y tensión, lo que lo hace menos estable que la prueba 1.

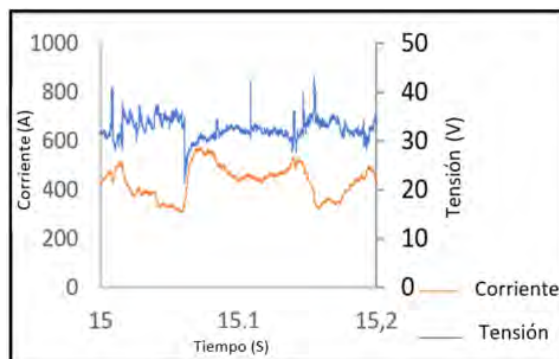


Figura 11. Tensión y corriente x tiempo - Prueba 2

La Figura 12 muestra los valores obtenidos de la soldadura realizada a la prueba 3, evidenciándose perturbaciones más elevadas que en la prueba 2 y la prueba 1, siendo esta la prueba con mayor inestabilidad del proceso.

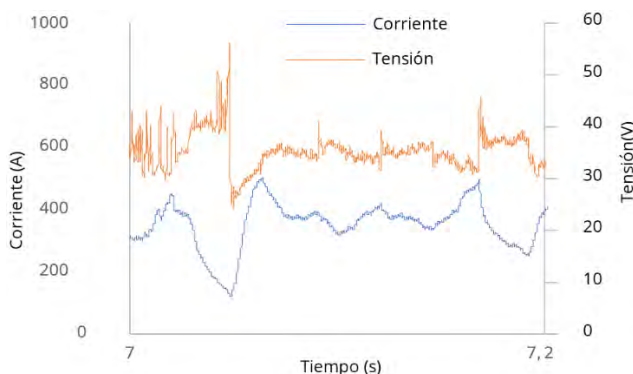


Figura 12. Tensión y corriente x tiempo - Prueba 3

La Tabla 4 muestra el resultado de la tensión media, la corriente media y la desviación estándar de las tres muestras.

Tabla 4. Datos experimentales

Tensión	1	2	3
Tensión media (V)	32,91	32,51	35,4
Corriente media (A)	453,53	436,72	352,64
Desvío estándar Tensión	1,59	2,12	3,44
Desvío estándar Corriente	43,42	66,16	75,57

A partir de los datos presentados en la Tabla 3, se puede observar que a medida que la corriente disminuye, las desviaciones estándar de la tensión y la corriente aumentan, siendo que los menores desvíos estándar se refieren a la prueba 1. Este hecho corrobora la afirmación realizada a partir de la Figura 9, el proceso que mostró mayor estabilidad fue el utilizado en la primera prueba.

A continuación, se presentan registros fotográficos de los cordones de soldadura, aclarando que las Figuras 13 y 14 se refieren a la prueba 1, las Figuras 15 y 16 a la prueba 2 y las Figuras 17 y 18 a la prueba 3.

En la Figura 13 se puede observar el aspecto superficial del cordón de soldadura de la prueba 1, donde se puede observar que no existen poros superficiales ni grietas, donde la cinta metálica lleno por completo el chaflán.

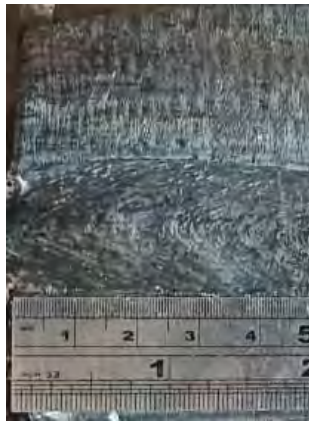


Figura 13. Aspecto exterior del cordón de soldadura - Prueba 1

Después de realizar el corte del cordón de soldadura y ser sometido por una preparación metalográfica, pasando por un proceso de lijado y atacado químicamente con Nital 5% (95% Ácido Nítrico y 5% d alcohol), para logra identificar las zonas de la soldadura como la zona térmicamente afecta, la línea de fusión y el metal depositado y también para observar defectos en la soldadura como grietas por solidificación, porosidad, falta de fusión en las paredes del chaflán e inclusión de escoria, se logró observar el área transversal del cordón de soldadura como se muestra en la Figura 14, donde se puede identificar que la cantidad de poros durante el proceso es despreciable, no se generaron grietas, buena fusión del metal depositado con las pards del chaflán y no existe inclusión de escoria.



Figura 14. Corte en el cordón de soldadura de la prueba 1

En la prueba 2 se logró identificar un aspecto superficial bueno sin presencia de poros ni grietas y buena deposición del metal (Figura 15), sin embargo, la parte superficial del cordón de soldadura tiene una apariencia gruesa o extensa.

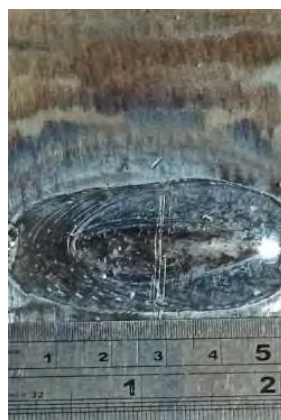


Figura 15. Aspecto exterior del cordón de soldadura - Prueba 2

En la parte interna del cordón de soldadura de la prueba 2 mostrado en la Figura 16, se logró identificar claramente presencia de poros por falta de fusión del metal depositado con la paredes del chaflán principalmente en la base, además se observa que en la parte superior del cordón de soldadura la cinta metálica se fundió de manera elevada, depositando mayormente metal de adición en esta parte del chaflán, además se logo identificar que no hay presencia de grietas ni inclusiones de escoria en el proceso.



Figura 16. Corte de Cordón de soldadura - Prueba 2

En la Figura 17 se puede observar el aspecto superficial de la prueba 3, evidenciándose poca presencia de poros superficiales y un cordón de soldadura no uniforme en comparación de la prueba 1 y prueba 2.



Figura 17. Aspecto exterior del cordón de soldadura - Prueba 3

En la Figura 18, se presenta el corte del cordón de soldadura donde se evidencia como principal imperfección la falta de fusión de la pared del chaflán, además de no llenar completamente el chaflán en la parte superior.



Figura 18. Corte en el cordón de soldadura de la Prueba 3

También se puede observar que en las tres pruebas fue posible llenar completamente los chaflanes con una sola pasada y el aspecto visual externo fue bueno en las tres muestras, sin embargo, internamente la mejor calidad del cordón se obtuvo en la muestra 1, es decir, en el proceso más estable.

4. CONCLUSIONES

La soldadura de chaflanes estrechos mediante el proceso de arco sumergido y un electrodo de sección transversal rectangular se ha mostrado prometedora, ya que tiene una alta tasa de deposición, que se puede probar con el llenado completo del chaflán en una sola pasada. Además, en las pruebas realizadas, al aumentar la corriente de soldadura la calidad del cordón mejoró considerablemente.

El material utilizado como metal de relleno fue el acero ASTM A-36, debido a su facilidad de adquisición. Sin embargo, para futuros trabajos y para su uso industrial es necesario el estudio de un electrodo de cinta con elementos de aleación capaces de ayudar a la calidad del cordón de soldadura.

Como complemento a este trabajo, se sugiere el estudio de las características mecánicas adquiridas por las probetas aquí estudiadas y la comparación con procesos establecidos de soldadura de chaflanes estrechos, como el GMAW (Gas Metal Arc Welding).

REFERENCIAS

- [1] Modenesi P. (1990). Statistical modelling of the narrow gap gas metal welding process. Grandfield Institute of Technology.
- [2] Thornton C. (1992). Increasing productivity in submerged arc welding. *Weld. Rev.* 11(1), 14–15.
- [3] Gimenes L. y Pinto J. (1990). Processo de Soldagem por Arco Submerso. Infosolda.com.br
- [4] Modenesi A. y Bracarense A. (2012). Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. Belo Horizonte.
- [5] TWI Group. (1999). Trade show shipping & Exhibition logistics specialist. Recuperado: <https://www.twigroup.com/>
- [6] Vasata P. (2013). Construção e avaliação de um calorímetro com vazão contínua de água para avaliação do rendimento térmico em processos de soldagem. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [7] ABNT. (2015). ABNT NBR 14842 - Soldagem 2015 - Válida a partir de edição Norma ABNT NBRABNT NBR Brasileira.
- [8] Guo N. et al. (2016). Effect of boric acid concentration on the arc stability in underwater wet welding. *Journal of Materials Processing Technology* 229, 244–252.

Aprender programación de computadores a partir del reconocimiento de patrones lexicográficos y lógicos usando Brain Based Learning BBL

Omar Iván Trejos Buriticá¹
Luis Eduardo Muñoz Guerrero²
Universidad Tecnológica de Pereira
Colombia

En este capítulo se exponen los resultados y las reflexiones derivadas de una investigación realizada en el aula, en el curso inicial de programación de computadores en el programa de Ingeniería de Sistemas y Computación, en el que las evaluaciones, los ejercicios en clase y los talleres se plantearon siguiendo el método de reconocimiento de patrones basado en Brain Based Learning BBL. El método adoptado fue de investigación cualitativa con análisis cuantitativo, sobre una base de comparación de cursos paralelos en programación de computadores. Los resultados evidencian que cuando se reta al cerebro en un contexto académico y dentro de un marco coherente de premios y castigos, la resolución se convierte en la base para que el aprendizaje suceda de manera más eficiente y rápida, comparado con los métodos tradicionales. Se concluye que técnicas como la que se expone en este trabajo son de utilidad en lo que se refiere a la enseñanza de la lógica de programación.

¹ Ingeniero de Sistemas, Especialista en Instrumentación Física, Magíster en Comunicación Educativa y Doctor en Educación.
Contacto: omartrejos@utp.edu.co

² Ingeniero de Sistemas, Magíster en Ingeniería de Sistemas y Doctor en Educación.
Contacto: lemunozg@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La adopción de estrategias que potencialicen el aprendizaje en los cursos de programación de computadores impartidos por profesores ingenieros poco a poco se ha ido convirtiendo en una necesidad tanto desde el aspecto formativo a alto nivel hasta el análisis y la investigación derivada de actividades adoptadas en el aula de clases como parte del proceso de formación [1]. En este capítulo se aborda el problema de la comparación entre los resultados de dos grupos paralelos de un curso inicial de programación en Ingeniería de Sistemas y Computación desde la perspectiva del aprendizaje basado en el cerebro (Brain Based Learning BBL) usando el reconocimiento de patrones lexicográficos y lógicos en la lectura, interpretación y redacción de respuestas a las preguntas planteadas en las evaluaciones parciales y evaluación final a lo largo del semestre.

El propósito de la investigación consistía en determinar cuáles resultados eran más favorables tanto en lo cuantitativo como en lo cualitativo en lo que se refiere al aprendizaje de la programación y la forma como dichos resultados comparativos estaban relacionados con la forma como se presentaban las pruebas tanto parciales como final a la luz de la metodología basada en el cerebro (BBL Brain Based Learning). La novedad del presente capítulo se encuentra en: 1) el desarrollo de una investigación educativa en el aula en un curso de programación en Ingeniería de Sistemas conducida por un Ingeniero, 2) la utilización de una estrategia de reconocimiento de patrones derivada del modelo de aprendizaje basado en el cerebro, y 3) el análisis comparativo con los métodos tradicionales de evaluación en los cuales poca innovación se presenta tanto particularmente en la forma como se presentan.

Esta investigación se ha justificado toda vez que la programación se ha ido convirtiendo poco a poco en la base, tanto para los programas de ingeniería como para programas que no son de ingeniería, para acceder y apropiarse el conocimiento y aplicaciones derivadas del pensamiento computacional, base moderna para el pensamiento crítico, el aprovechamiento de las tecnologías de la información y la comunicación y la algoritmización de las soluciones a los problemas de la sociedad que emergen desde los nuevos escenarios.

Tanto en programas de ingeniería como en otros programas de formación profesional, la neurociencia se ha ganado un espacio que recién se está empezando a conocer [2] y que, apoyado en el modelo de aprendizaje basado en el cerebro, puede llegar a brindar frutos muy significativos en los procesos de aprendizaje de diversas áreas de conocimiento [3], a lo cual el aprendizaje de la programación no se sustrae y se sustenta en la teoría del aprendizaje significativo y el aprendizaje por descubrimiento.

Este capítulo es un producto del proyecto de investigación enmarcado en los lineamientos de la metodología científica y su apropiación en relación con la investigación cualitativa desde el análisis cuantitativo. La investigación llega hasta establecer el comparativo cualitativo de los resultados cuantitativos obtenidos en las evaluaciones parciales y evaluación final de dos cursos de programación paralelos en los cuales, con uno se adoptó la metodología de reconocimiento de patrones derivada de Brain Based Learning y en el otro se mantuvo lo que aquí se ha denominado metodología tradicional (exposición magistral, asesoría personalizada, ejercicios en clase, talleres para resolver en casa).

La investigación se realizó en la asignatura Programación I, del programa de Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, durante los semestres I y II de 2017, 2018 y 2019. El presente capítulo está organizado según los estándares de la metodología IMRYD [4], que involucra una introducción, un marco teórico, la exposición de metodología y los resultados, y finaliza con una discusión y unas conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO

La búsqueda de significado es una condición innata del cerebro pues, en todo momento, este órgano es el que procesa la información, sensaciones y percepciones que se reciben a través de los sentidos y que normalmente intentan interpretar el contexto con el cual el ser humano interactúa [5]. Dicha búsqueda de significado cobra más sentido cuando se trata de procesos de aprendizaje unidos a ciclos de formación académica sean estos profesionales o informales.

Esta condición natural del cerebro fue la que permitió, después de muchas investigaciones, que se formulara la teoría del aprendizaje significativo según la cual el ser humano (exactamente su cerebro) aprende mucho más fácil todo aquello que tiene significado para él y en donde se prioriza que lo más importante en un proceso de aprendizaje es lo que el estudiante ya sabe [6].

En la teoría de aprendizaje significativo se crea un triunvirato entre el conocimiento previo (que corresponde al conjunto de saberes y experiencias que han formado la perspectiva del estudiante a través de su interacción con los tres contextos que lo han guiado: el contexto del aula, el contexto institucional y el contexto extrainstitucional), el nuevo conocimiento (que corresponde a ese conjunto de saberes a los cuales el estudiante aún no ha accedido o que, definitivamente, son completamente nuevos frente al estado del arte de la ciencia, la tecnología, las artes y el conocimiento en general) y la actitud del estudiante (que se basa en dos principios: la motivación y la capacidad para establecer relaciones o nexos de transformación y enlace entre el conocimiento previo y el nuevo conocimiento) [7]. Es de anotar que en la promoción de la motivación y en el desarrollo de la capacidad para enlazar conocimientos previos con nuevos conocimientos tiene que ver mucho el conjunto de estrategias y actividades que para tal fin adopte el profesor.

Por su parte, también se ha establecido que el ser humano aprende más fácil todo aquello que descubre por sus propios medios y que se deriva de unos conocimientos adquiridos que se complementan con aquellos que se descubre [8]. El aprendizaje por descubrimiento acude también a la misma característica natural del cerebro que permanentemente busca significado a todo aquello que es capturado o recibido por los sentidos. Vale la pena tener en cuenta que cuando el cerebro no encuentra dicho significado, almacena la información y prontamente, bien por falta de uso o por falta de sentido, termina desechándola de manera autónoma.

En el aprendizaje por descubrimiento se cumplen tres fases muy claras: la apropiación o contacto con el nuevo conocimiento, la asimilación o transformación a partir de su relación con conocimientos previos y la evaluación de este nuevo conocimiento en diferentes contextos [9]. Es esta tercera fase la que configura, después de su refinamiento, lo que en la actualidad se ha coincidido en llamar como Competencia que no es más que la aplicación espontánea del conocimiento en situaciones en las cuales el estudiante no se ha entrenado o en donde aún no se ha encontrado espacio para su uso.

En el aprendizaje por descubrimiento la motivación del estudiante se basa en un marco coherente de premios y castigos, es decir, en un conjunto de factores que le permitan al estudiante ver los retos como alcanzables a la luz de los conocimientos adquiridos para lo cual el profesor debe centrar su trabajo en realizar diseños de ejercicios, pruebas, talleres, evaluaciones, estrategias y actividades en general que se articulen con ese propósito.

De estas teorías y de las características y condiciones innatas del cerebro se deriva el BBL, que es un modelo pedagógico que busca atender los requerimientos naturales del cerebro dentro de un contexto de aprendizaje [10]. En el desarrollo de esta teoría, la neurociencia y la neuroeducación ha hecho aportes importantes para que, a todo nivel, el aprendizaje suceda dentro de los linderos propios del cerebro y sobre la base de la búsqueda del significado a partir de lo que el ser humano descubra [11]. BBL podría decirse que, en lo pedagógico, es un punto de encuentro entre la teoría de aprendizaje significativo y la teoría de aprendizaje por descubrimiento.

Aplicar la metodología BBL dentro de un contexto de aprendizaje de la programación, implica acudir a los principios fundamentales del pensamiento computacional que busca promover el pensamiento crítico (la revisión, evolución y retroalimentación de un conjunto de reglas dentro de un contexto determinado) [12], el aprovechamiento de las TIC (dada la gran penetración que en la actualidad tienen las nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación) y la algoritmización de las soluciones (que propende por capitalizar lo mejor del pensamiento humano con las posibilidades que ofrece la computación para que la sociedad pueda disfrutar de las soluciones que se deriven del pensamiento computacional) [13].

Ahora bien, para el aprendizaje de la programación y la apropiación del pensamiento computacional en sus tres principios fundamentales, la base compete a la lógica de programación que es la base sobre la cual

descansa todo el sistema conceptual de paradigmas que la programación de computadores provee [14] y entre se destaca la programación funcional, la programación imperativa y la programación orientada a objetos [15].

La lógica de programación consiste en un conjunto de reglas binarias que permiten la capitalización de las capacidades de procesamiento, almacenamiento y respuesta de las tecnologías modernas de información y comunicación y la programación de computadores se ha convertido en un área que cada vez se ha ido incorporando en más programas de formación profesional debido a los aportes que, en un contexto moderno, hace al ser humano el pensamiento computacional y que se articula con la interpretación de las necesidades de la sociedad contemporánea a la luz de los nuevos escenarios que cada surgen como producto de sus requerimientos [16].

Aprender a programar se ha ido convirtiendo en uno de los requisitos del mundo de hoy pues, según Jeanette Wing promotora Microsoft del pensamiento computacional, entender la forma como interactúan las partes de un computador o de cualquier dispositivo digital y además adoptar y asimilar las partes de dicho pensamiento computacional es un eficiente camino para aprender a pensar en tiempos modernos en donde el ser humano tiene que interactuar de una parte con el conocimiento, de otra parte con la sociedad y de otra parte con la tecnología. El pensamiento computacional se apoya en el desarrollo de:

1. Un pensamiento crítico que no se convierte en la crítica per se sino en la mirada que busca relacionar un problema con su entorno y, de esta forma, buscar los mejores caminos para resolverlo dependiendo de las características, posibilidades y opciones que dicho entorno provea o que la tecnología posibilite. El pensamiento crítico aporta una perspectiva holística tal que puede pensar en las causas del problema, en el impacto de ese mismo problema y en las consecuencias que quedarían posteriores a la existencia o presencia del problema. Desde esta mirada es posible pensar no solo en la solución como el camino para que el problema deje de existir o que deje de impactar el entorno al punto de ser imperceptible, sino que además se puede pensar en diferentes vías que posibiliten la prevención y que eviten la ocurrencia de nuevo del mismo problema con sus respectivas consecuencias, posiblemente magnificadas por el paso del tiempo y la maduración de las condiciones que fortalecen su existencia.

El pensamiento crítico es la base para que se entienda la tecnología como una forma de resolver un tipo de problemas que se conocen como computables o computacionales, es decir, son aquellos que pueden resolverse rápidamente con la utilización de computadores o sistemas computacionales. En este sentido el pensamiento crítico, desde la perspectiva del pensamiento computacional, posibilita una mirada que plantea posibilidades dentro del contexto de la sociedad, las condiciones y las posibilidades de hoy y que invita a la tecnología a formar parte de dicha solución. Debe anotarse que existen problemas, como los problemas humanos, que no son computables en su estado natural pero que se han ido modificando de manera que puedan apoyarse en tecnología digital para encontrar soluciones o, por lo menos, para aprovechar las posibilidades que ofrece el mundo digital de hoy.

2. La resolución de problemas que constituye una de las aristas más importantes en cualquiera de los programas formativos a nivel superior que la universidad debe incluir como parte de su oferta académica. Resolver problemas implica en primer lugar tener una mirada crítica que permita analizar la relación del problema con su entorno y el desglose de variables, indicadores y cuantificadores que permitan describir en lo cuantitativo y comprender en lo cualitativo la naturaleza de aquella situación, enunciado o planteamiento que se ha convertido en una situación problema. Cuando se habla de la resolución de problemas debe recordarse que el matemático que más colaboró en el desarrollo matemático de esta área fue el polaco Pólya quien planteó que la solución de un problema, desde una perspectiva matemática, consta de cuatro pasos: en primer lugar se requiere entender el problema para poder conocer en detalle el desglose de las partes que lo componen, del impacto que éste genera, de las razones que lo causaron y del efecto *a posteriori* que quedará cuando el problema haya desaparecido, análisis que se requiere hacer pues son muchos los problemas que dejan una estela de sombra que sigue afectando el entorno en el cual éste se desarrolló a pesar de que ya no afecte directamente dicho entorno. La resolución de problemas es una de las competencias más importantes en la formación de profesionales de los tiempos actuales si se tiene en cuenta que los escenarios de hoy tienen tres

características incontrolables: a) son impredecibles, b) son constantemente cambiantes, c) son fugaces. Desde esta perspectiva, resolver un problema en tiempos de hoy requiere tener muy clara la definición de este para que de esta forma se pueda enfrentar su solución con el mismo dinamismo con que pudo surgir dicho problema.

Pólya plantea en segundo lugar la necesidad de planear una solución partiendo del hecho de que esta condición solo es posible si éste ha sido plenamente comprendido lo cual se puede verificar cuando se describe, se explica, se replantea o se alteran sus condiciones y características. Planear una solución significa tener la capacidad de enfrentar el problema para hacer que éste desaparezca o que su impacto sea tan mínimo que en muchos casos llegue a ser imperceptible. La solución es el conjunto de pasos o acciones que hacen que debilitan el problema al punto de llegar, en muchos casos a desaparecerlo. En tercer lugar, se plantea la necesidad de poner en funcionamiento dicho plan o sea de ejecutarlo de forma que se enfrente el problema con su solución y así se pueda verificar la existencia de pasos que afecten a las variables o condiciones que sean adversas y que generen la existencia del problema de forma que lleguen a atenuarlas de forma considerable o incluso a desaparecerlas. El último paso de la metodología de Pólya implica examinar la solución obtenida que consiste en confrontar si las variables, condiciones o cuantificadores que generan el problema aún persisten y de ser así, consiste en encontrar las razones por las cuales persisten pues de otra forma el problema a resolver seguirá existiendo. Corresponde esto a un *loop* conceptual en donde mientras las condiciones que generan el problema existan, el mismo problema también existirá.

3. El uso de la tecnología corresponde a la tercera parte del pensamiento computacional y debe comenzar por comentarse que sería imposible pensar que el mundo de hoy estuviera desligado tan íntimamente de la tecnología. La razón es muy sencilla: el mundo ha sido inundado de tecnología por tres razones muy contundentes: de una parte está el crecimiento desmedido de la información en todos los niveles, en todas las formas de expresión de la vida social y en todas las aristas de la sociedad; en segundo lugar se tienen los intereses comerciales que han sabido capitalizar las posibilidades que ofrece la tecnología y convencer a los seres humanos, que corresponden a su mercado natural, de que ésta es imprescindible. Pudiera no serlo, pero el mercado digital se ha encargado, con todas sus herramientas, de convencer a la sociedad del siglo XXI de lo contrario. En tercer lugar, las mismas necesidades actuales y cambiantes del ser humano y su articulación con las posibilidades, herramientas, servicios y facilidades que dicha tecnología provee pues cada vez el hombre inventa nuevas formas de requerir información, crea nuevas fuentes de información y se satisface solamente cuando sus necesidades han sido cumplidas de forma plena, absoluta y duradera. Pensar en todas las opciones que ofrece la tecnología en el mundo de hoy es pensar en ese mismo mundo, preñado de pantallas por doquier, de teclas, de dispositivos digitales, de comunicación impersonal, síncrona o asíncrona, de acceso de tantas formas de información (sonora, visual, multicolor, etc.).
4. La cuarta cara del pensamiento computacional es mucho más técnica y podría decirse que es el resultado de la conjunción de los elementos anteriores y consiste en el diseño de soluciones bajo los parámetros y reglas que provee el concepto de *algoritmo*. Este vocablo es un homenaje al gran difusor del álgebra, Al Juarizmi, quien promovió desde la Casa de la Sabiduría en Bagdad una serie de conocimientos matemáticos condensados en varios tomos que abrían el camino formal para lo que posteriormente se conocería como Álgebra. El desarrollo de algoritmos o lo que se conoce informalmente como la *algoritmización* de una solución es, en palabras sencillas, la puesta en escena de una solución escrita en términos en que pueda ser fácilmente convertible a un lenguaje de programación, es decir, que esté escrito en un conjunto de pasos ordenados y secuenciales. Que estos pasos sean ordenados significa que tienen un orden específico que indica la forma en que deben ejecutarse, aunque debe admitirse que en algunos algoritmos el orden de pasos puede alterarse, pero solo de forma leve y nunca de forma significativa. Que estos pasos sean secuenciales significa que obedecen a una secuencia lógica, es decir, que se ejecuta un paso después de su antecesor y antes de su sucesor, exceptuando el 1er y último paso pues el primer paso no tiene antecesor y el último paso no tiene sucesor. El algoritmo es la descripción clara de la forma como debe transformarse la lógica deliberativa en lógica computacional pues se abandona ese amplio mundo difuso sobre el cual el ser humano toma sus decisiones para acudir a una serie de reglas y parámetros definidos y concretos que son los que hacen que el computador, bajo un

modelo puramente digital, pueda funcionar, tomar decisiones, ejecutar procesos repetitivo y, en general, simular muchas tareas del pensamiento humano pero aventajándolo en velocidad de procesamiento y de respuestas así como en capacidad de almacenamiento específicos.

La lógica de programación es la base sobre la cual, posteriormente, se pueden capitalizar todas las bondades, posibilidades y capacidades de los lenguajes de programación. Esa lógica invita a conocer, apropiarse, asimilar, aprender, retroalimentar y evaluar cuatro conceptos que son específicamente los que cambian la mirada desde la lógica deliberativa humana hacia la lógica computacional digital:

1. La metodología para resolver problemas computacionales que implica tener una perspectiva clara y definida en cuanto al marco de referencia sobre el cual se puede empezar a trabajar en soluciones lógicas de cara a su posibilidad de ser ejecutadas en un computador. En este aparte, se incluyen conceptos como la definición, comprensión y desglose del enunciado o problema, el análisis semántico y el análisis EPS. En su definición más simple, la comprensión de un problema implica un análisis que siempre debe hacerse por simple que éste sea y que conlleva a seleccionar las palabras que en la realidad describen el problema como tal. La selección de dichas palabras es lo que se conoce como análisis semántico y que va acompañado de su definición dentro de los linderos en los cuales el problema existe.

De la forma clara como se seleccionen y definan las palabras que describen al problema, se deriva el análisis Entrada-Proceso-Salida EPS, una descripción algorítmica de la solución en términos humanos, entendibles para todos. EPS incluye los conceptos, valores o variables que se requieren para resolver el problema (Entrada), los usos que se le deben dar a estos elementos tal que en su combinación, puedan resolver de forma efectiva y eficiente el problema (Proceso) desde una forma puramente algorítmica y los resultados que se esperan una vez se haya ejecutado el proceso que fue alimentado por las variables de entrada (Salida). Cuando esta parte se ha realizado de forma efectiva, y solamente en este momento, es cuando se puede proceder a convertir el proceso en programa según los lineamientos conceptuales que constituyen un paradigma de programación que no es más que una forma de resolver un problema pues, en computación, son muchas las formas como hacer esto.

2. Los conceptos básicos como los mecanismos de almacenamiento, de procesamiento, los operadores y los condicionales que implican la comprensión del núcleo principal del paradigma específico que se haya seleccionado como camino para resolver el problema. Tal es el caso del concepto de función en el paradigma funcional, el concepto de variable en el paradigma imperativo y el concepto de objeto en el paradigma orientado a objetos.
3. Los procesos repetitivos que se pueden mirar desde la codificación libre y sin reglas, desde la recursividad como forma de aprovechar al máximo los recursos computacionales de la máquina, desde las formas estructuradas (ciclo para, ciclo mientras que y ciclo haga mientras) que permiten tener unos esquemas fijos que simplifican la construcción de dichos procesos repetitivos.
4. Los conjuntos de datos que permiten manejar la esencia que justifica la razón de ser de la informática con toda su batería de herramientas, servicios, tecnología y facilidades. Las listas, los vectores, las matrices, las multilistas, los datos enumerados y muchas otras formas de manejar conjuntos de datos facilitan la interpretación del mundo en su estado natural y la simulación de este en la memoria de un computador.

Con estos elementos se puede decir que lo que se busca en esta investigación es aprovechar una característica propia del cerebro (como es la búsqueda de patrones) para simplificar el aprendizaje de la programación, es decir, utilizar el cerebro con dicha facultad como puente entre la lógica deliberativa humana y la lógica computacional digital.

3. MÉTODO

Para el desarrollo de la investigación que inspira el presente capítulo se procedió según los siguientes ítems metodológicos:

- Desde el inicio del semestre se seleccionaron dos cursos de Programación I en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Tecnológica de Pereira y, aleatoriamente, se designó uno de ellos para aplicar metodología BBL por reconocimiento de patrones lexicográficos y lógicos y el otro para realizar un trabajo a la luz de la metodología tradicional de enseñanza (exposición magistral, asesorías personalizadas, ejercicios en clase y talleres).
- En ambos cursos seleccionados, por semestre, se realizaron 3 evaluaciones parciales y 1 evaluación final en condiciones de modo, tiempo y lugar similares con el ánimo de mantener la objetividad científica que corresponde en este tipo de investigaciones.
- El formato y diseño de las evaluaciones parciales como la evaluación final fueron similares, aunque el contenido fue diferente. En ambos casos se mantuvo como hilo conductor las temáticas vistas en las 4 semanas anteriores a la evaluación parcial.
- En ambos cursos se realizó la 1ª evaluación parcial en la 4ª semana, la 2ª evaluación parcial en la 8ª semana y en la 3ª evaluación parcial en la 12ª semana.
- En el curso donde no se adoptó la metodología BBL, tanto las evaluaciones parciales como la evaluación final, los ejercicios para desarrollar en casa como los ejercicios para resolver en la clase fueron redactados haciendo uso del idioma español sin acudir a ningún tipo de patrones.
- En el curso donde se adoptó la metodología BBL, se acudió al reconocimiento de patrones lexicográficos y lógicos en la redacción de las evaluaciones parciales, la evaluación final, los ejercicios a desarrollar en casa y los ejercicios para resolver en la clase
- En el curso donde no se adoptó la metodología BBL un enunciado tipo fue: *Construir un programa que permita leer un número entero y calcular la suma de todos sus dígitos teniendo en cuenta que no se conoce la cantidad de dígitos del número.* En el curso donde se adoptó la metodología BBL, el enunciado equivalente al anterior fue: *CON57RU1R UN PR06R4M4 QU3 P3RM174 L33R UN NÚM3R0 3N73R0 Y C4LCUL4R L4 5UM4 D3 70D05 5U5 D161705 T3N13ND0 3N CU3N74 QU3 NO 53 CONOC3 L4 C4N71D4D D3 D161705 D3L NÚM3R0*

Debido a que el cerebro, cuando percibe algo que no entiende, busca el patrón más cercano dentro de los conocimientos que alberga e intenta contextualizarlo, de manera autónoma, a la luz de la realidad que el ser humano esté viviendo. Cuando el estudiante observa este tipo de enunciados, busca una interpretación aproximada dentro del contexto académico de evaluación. Eso hace trabajar el cerebro antes de resolver un enunciado y, sobre una base lexicográfica y lógica, posibilita su resolución por los caminos que provee el pensamiento computacional.

- En ambos cursos, cada evaluación parcial tuvo un peso del 20% y la evaluación final del 30% 30% en relación con la nota definitiva. Los ejercicios en clase y los talleres para resolver en casa formaron parte de la nota de alguna de las evaluaciones parciales o se adoptaron como preparación para las diferentes pruebas escritas. El restante 10% se utilizó como motivación para los estudiantes.
- Todas las pruebas se realizaron en el aula y se presentaron de manera escrita.
- Al final de semestre, cuando concluye la investigación, siempre se indagó la opinión escrita de los estudiantes acerca del proceso como tal.
- En todo momento, la observación, el diálogo y la interacción con los estudiantes formaron parte integral como estrategias cualitativas del proceso de investigación.

4. RESULTADOS

En la Tabla 1 se presenta la cantidad de estudiantes involucrados, tanto en los cursos donde se adoptó la metodología BBL como en los que se adoptó lo que en este capítulo se denomina metodología tradicional.

Tabla 1. Estudiantes involucrados en la investigación

Año	Sem	Curso con BBL	Curso sin BBL	Total x Sem
2017	I	22	23	45
	II	21	23	44
2018	I	21	20	41
	II	22	21	43
2019	I	22	20	42
	II	21	21	42
Total		129	128	257

Las Tabla 2 y 3 presentan los resultados cuantitativos de las evaluaciones parciales, respectivamente. Para facilidad de presentación de los datos y sin que ello cambie las inferencias a que hubo lugar, se adoptó como medida de tendencia central el promedio de las notas obtenidas.

Tabla 2. Resultados evaluaciones parciales

Año	Sem	Curso con BBL			Curso sin BBL		
		I P	II P	III P	I P	II P	III P
2017	I	4,8	4,5	4,2	3,8	3,5	3,1
	II	4,6	4,4	4,2	3,8	3,6	3,2
2018	I	4,6	4,4	4,1	3,9	3,4	3,2
	II	4,7	4,5	4,0	3,6	3,4	3,1
2019	I	4,5	4,3	4,2	3,7	3,5	3,1
	II	4,6	4,3	4,3	3,8	3,6	3,2
Promedio		4,6	4,4	4,2	3,8	3,5	3,2

Tabla 3. Resultados evaluación final

Año	Sem	Curso con BBL	Curso sin BBL	Diferencia
2017	I	4,6	3,3	1,3
	II	4,8	3,4	1,4
2018	I	4,8	3,5	1,3
	II	4,7	3,4	1,3
2019	I	4,6	3,4	1,2
	II	4,7	3,3	1,4
Promedio		4,7	3,4	1,3

La Tabla 4 presenta el resultado cuantitativo de las opiniones cualitativas de los estudiantes en relación con el proceso de investigación. Al finalizar el semestre se les permitió a los estudiantes que, con una respuesta abierta, espontánea y libre, manifestaran su experiencia dentro del grupo donde les había correspondido. Sobre esa base se revisaron las respuestas y se calificó, según la opinión consignada, si era favorable al dicho proceso o no.

Tabla 4. Opiniones sobre el proceso

Año	Sem	Cursos con BBL		Cursos sin BBL		Total
		OpFav	OpDesf	OpFav	OpDesf	
2017	I	20	2	20	3	45
	II	18	2	19	4	43
2018	I	17	4	18	1	40
	II	20	1	17	3	41
2019	I	18	0	18	2	38
	II	19	2	17	2	40
Total		112	11	109	15	247
%		45%	5%	44%	6%	100%

OpFav = Opinión favorable, OPDesf = Opinión Desfavorable

5. DISCUSIÓN

La muestra de estudiantes involucrada en la investigación corresponde al 20% de la población objetivo (estudiantes de I semestre de Ingeniería de Sistemas, asignatura Programación I) debido a que, por semestre, la cantidad promedio de estudiantes es de 200 (que corresponde a 5 cursos de 20 estudiantes

cada uno, en promedio). La muestra semestral es de 2 cursos, o sea 40 estudiantes que corresponde al 20% lo cual estadísticamente posibilita realizar inferencias extrapolables a toda la población.

En cuanto a los resultados de las evaluaciones parciales y de la evaluación final (considerando que éstas fueron diseñadas para ambos cursos manteniendo la forma estructural, la temática y la profundidad de las preguntas, los enunciados y los ejercicios) se observa en la Tabla 2 y en la Tabla 3 que existe una notoria tendencia favorable en los cursos donde se adoptó la metodología PBL. En la Tabla 2, por ejemplo, en dichos cursos se nota que todas las notas del I parcial fueron superiores o iguales a 4,5, las notas del II parcial estuvieron alrededor de 4,5 y el III parcial tuvo notas en el rango 4,0 a 4,5.

En cuanto a los cursos donde se adoptó lo que en este capítulo se ha denominado como metodología tradicional (sin aplicación de BBL), las notas del I parcial estuvieron en el rango 3,6 a 3,9, las del II parcial giraron (de manera muy cercana) alrededor del valor 3,5 y las del III parcial estuvieron muy cercanas a 3,0. En los tres casos las notas evaluativas con los cursos BBL fueron superiores que las notas evaluativas equivalentes con los cursos no BBL con diferencia que llegó a ser superior a la unidad, es decir, una diferencia superior al 20% si se considera que la nota máxima es 5,0.

Por su parte, la Tabla 3 presenta el promedio de las notas de la evaluación final en ambos cursos y en ella se observa una diferencia de hasta 1,4 a favor de los cursos con metodología BBL. Es de anotar que la evaluación final de ambos cursos por semestres fue la misma y se realizó conjuntamente, es decir, a la misma hora, en el mismo lugar y bajo las mismas condiciones de aula. En cuanto al promedio de ambos cursos por semestre se obtuvo una diferencia de 1,3 que corresponde al 26% en relación con la nota máxima de 5,0. Esto nos indica una alta efectividad de la metodología adoptada vista desde el aprendizaje. Por otra parte, el hecho de que el promedio de la evaluación final de los cursos BBL fuera de 4,7 significa, como efectivamente lo fue, que hubo varias evaluaciones que obtuvieron la nota máxima (5,0) y el hecho de que el promedio de los cursos sin BBL fuera de 3,4 indica que hubo notas con tendencia a 3,0 o, incluso como sucedió en la realidad, con valoración inferior a 3,0.

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos luego de un análisis contextual y cualitativo de las opiniones de los estudiantes en relación con el proceso de investigación. Lo primero que se debe aclarar es que el total de estudiantes de la tabla 4 (247) difiere de la cantidad total de estudiantes presentados en la tabla 1 (257) debido a que 10 estudiantes, por diferentes razones, se retiraron de los cursos correspondientes que se habían seleccionado por semestre para participar en la investigación. Los motivos para tal acción no son tema de este capítulo.

A los estudiantes se les permitió que fueran tan abiertos y espontáneos como pudieran ante la pregunta: ¿cómo le pareció su participación en el proceso de investigación? Verbalmente se les explicó que, ante esta pregunta, podían escribir sobre lo que habían aprendido, lo que les había gustado, las expectativas, los aciertos y las frustraciones que tuvieron en el proceso, en fin, que tuvieran libertad de exponer sus razones desde una perspectiva absolutamente libre.

Una por una de estas respuestas se revisó desde la perspectiva de mirar si dicha opinión era favorable o desfavorable al proceso. Independiente del grupo en donde los estudiantes habían participado, se observó una alta favorabilidad al proceso en general. Tanto en los cursos con BBL como en los cursos sin BBL se pudo notar que la opinión giraba en torno y a favor de la utilización de la metodología BBL en la redacción no solo de las evaluaciones, fueran estas parciales o finales, sino también en la redacción de ejercicios, enunciados y talleres en general.

Los valores porcentuales hablan por sí solos ya que, en general, la opinión favorable de la investigación (fuera por lo aprendido, por la motivación que generaba, por lo insólito, por despertar la curiosidad, etc. que se derivan del aprendizaje por descubrimiento) se aproxima al 90% lo cual indica una aceptación alta si se tiene en cuenta que el factor motivaciones es el componente más importante de la actitud del estudiante, parte de las bases de la teoría de aprendizaje significativo que, con el conocimiento previo y el nuevo conocimiento, indica que un proceso de aprendizaje debe apuntar hacia lo que se aprenda por encima de cualquier otra consideración.

6. CONCLUSIONES

D3 4CU3RD0 4L PR0P05170 D3 L4 PR353N73 1NV357164C1ÓN QU3 8U5C484 D373RM1N4R CUÁL35 R35UL74D05 3R4N MÁ5 F4V0R48L35 74N70 3N L0 CU4N717471V0 C0M0 3N L0 CU4L17471V0 3N L0 QU3 53 R3F13R3 4L 4PR3ND1Z4J3 D3 L4 PR06R4M4C1ÓN Y L4 F0RM4 C0M0 D1CH05 R35UL74D05 C0MP4R471V05 357484N R3L4C10N4D05 C0N L4 F0RM4 C0M0 53 PR353N7484N L45 PRU3845 74N70 P4RC14L35 C0M0 F1N4L 4 L4 LUZ D3 L4 M370D0L06Í4 D3 4PR3ND1Z4J3 8454D0 3N 3L C3R38R0 (88L 8R41N 8453D L34RN1N6) Y 70M4NDO C0M0 8453 L05 R35UL74D05 0873N1D05 Y PR353N74D05 3N 3L Í73M C0RR35P0ND13N73.

PU3D3 C0NCLU1R53 QU3 L4 4D0PC1ÓN D3 357R4736145 88L D3 R3C0N0C1M13N70 L3X1C06RÁF1C0 Y LÓ61C0 D3 P47R0N35 35CR1705 3N L4 R3D4CC1ÓN Y PR353N74C1ÓN D3 PRU3845 P4RC14L35, PRU3845 F1N4L35, 3J3RC1C105, 3NUNC14D05, 74LL3R35 Y PL4N734M13N705 63N3R4L35, 35 4850LU74M3N73 F4V0R48L3 4L 4PR3ND1Z4J3 P0R 3NC1M4 D3 L05 R35UL74D05 QU3 53 PU3D3N 0873N3R, 3N 3L M15M0 53N71D0, CU4ND0 53 4D0P74 UN4 M370D0L06Í4 7R4D1C10N4L 8454D4 3N 3XP051C1ÓN M46157R4L, 45350RÍ4 P3R50N4L1Z4D4, 3J3RC1C105 3N CL453 Y 74LL3R35 P4R4 L4 C454 35CR1705 Y PR353N74D05 3N 35P4Ñ0L (0 CU4LQU13R 1D10M4 N471V0) 51N N1N6UN4 7R4N5F0RM4C1ÓN QU3 PR0MU3V4 3L U50 D3 L4 LÓ61C4 Y 3L P3N54M13N70 C0MPU74C10N4L 3N 3L C3R38R0.

53 CUMPLÍO C0N L05 3L3M3N705 1NN0V4D0R35 D3 L4 1NV357164C1ÓN D4D0 QU3 53 R34L1ZÓ L4 1NV357164C1ÓN 3N 3L 4UL4 84J0 L4 C0NDUCC1ÓN D3 UN 1N63N13R0 D0C3N73 C0N F0RM4C1ÓN D3 4L70 N1V3L 3N L45 C13NC145 D3 L4 3DUC4C1ÓN, 53 4PR0V3CHÓ 3L R3C0N0C1M13N70 D3 P47R0N35 L3X1C06RÁF1C05 Y LÓ61C05 D3R1V4D05 D3 L05 PR1NC1P105 D3 L4 M370D0L06Í4 D3 4PR3ND1Z4J3 8454D4 3N 3L C3R38R0 (88L) Y 53 L06R4R0N L05 08J371V05 D3 4PR3ND1Z4J3 3N PR06R4M4C1ÓN D3 C0MPU74D0R35, P0R 3NC1M4 D3 L0 QU3 3N 3573 4R7ÍCULO 53 H4 LL4M4D0 C0M0 M370D0L06Í4 7R4D1C10N4L.

7. REFERENCIAS

- [1] Diaz A. y et al. (2014). Metodología de la investigación educativa. Editorial Diaz de Santos.
- [2] Small G. (2009). Digital Brain. Editorial Urano.
- [3] Fuentes I. y Moo M. (2017). Dificultades de aprender a programar. Revista Educación en Ingeniería 12(24), 76-82.
- [4] Aamodt S. y Wang S. (2008). Entra en tu cerebro. Ediciones B.
- [5] Ausubel D. (2010). Psicología Educativa: Un enfoque cognitivo. McGraw-Hill.
- [6] Ausubel D. (2012). The acquisition and retention of knowledge. Springer.
- [7] Bruner J. (2009). Actos de significado. Alianza Editorial.
- [8] Bruner J. (2006). Hacia una teoría de la instrucción. Editorial Limusa.
- [9] Manes F. y Niro N. (2018). El cerebro del futuro. Editorial Planeta.
- [10] Jensen E. y McConchie L. (2020). Brain Based Learning: Teaching the way students really learn. Corwin Editions.
- [11] Wing J. (2006). Computational Thinking. Communications on the ACM 49(3), 33-35.
- [12] Sousa D. (2016). How the Brain Learns. Corwin Editions.
- [13] Trejos O. (2018). Lógica de Programación. Ediciones de la U.
- [14] Trejos O. (2019). Programación Funcional con Racket. Editorial RaMa.
- [15] Annanth M. (2018). Humanities and Engineering Education. Recuperado: <http://www.t5eitm.org/2016/03/importance-humanities-engineering-education/>
- [16] Day R. (2005). How to write publish scientific works. The Oryx Press.

Modelo de arquitectura empresarial utilizando el lenguaje de modelado Archimate: Un estudio de caso

José Daniel Peña Meneses¹
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Colombia

Actualmente, las empresas tienen el reto de estar a la vanguardia de las necesidades de la sociedad, por lo que se vuelve imperiosa la innovación tecnológica que les permita ser más competitivas y alinearse con la estrategia de la organización. El objetivo de este trabajo es elaborar una propuesta de Arquitectura Empresarial para el producto mInstituto de la empresa Creatics, que se dedica al desarrollo de software. El estudio es de alcance descriptivo, se utiliza la metodología TOGAF a través de la arquitectura ADM. Así mismo se utiliza Coloso, una plataforma de desarrollo dirigida a la gestión integral del proceso de Ingeniería del Software para desarrollar metodologías de arquitectura empresarial. Se realizó la descripción de los diferentes puntos de vista que abarcan toda la operación, generando la visión global de la misma y su respectiva alineación con los objetivos estratégicos. Se concluye que la arquitectura empresarial permite definir el estado ideal en el que se desea que se encuentre la empresa, contribuyendo a la generación de una planeación estratégica con bases realmente sólidas, que garantice que cumple las expectativas y requerimientos en cuanto a necesidades de gestión y que se encuentre en capacidad de responder acertadamente a los cambios que se presentan en el contexto.

¹ Ingeniero de Sistemas y Estudiante de Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones.
Contacto: jdpenam@correo.udistrital.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las transformaciones que se han dado desde lo tecnológico han planteado la necesidad de introducir cambios en diferentes campos del conocimiento. Es así como el sector empresarial no es ajeno a lo anterior, por lo que actualmente enfrenta un constante y creciente fenómeno de innovación, fundamentalmente tecnológico [1]. Uno de los problemas que aparecen en este escenario es la pérdida de competitividad de la empresa y esto se acrecienta si los procesos de negocio no están alineados e integrados con la estrategia de la organización [2].

Esta situación de cambio ha ido creando la necesidad de un nuevo enfoque arquitectónico estructurado, integrado y sistematizado con una visión empresarial cuya aplicación permita a las empresas ser competitivas con las Tecnologías de la Información TI [3]. En este escenario la Arquitectura Empresarial AE surge como una metodología que describe formalmente el sistema visualizando de forma global los elementos de las organizaciones, su relación en la consecución de los objetivos estratégicos y su evolución en el tiempo [4].

Actualmente, la AE permite visualizar el estado actual de una organización a través de modelos y evaluar la dirección estratégica, planteando arquitecturas y modelos de escenarios en el futuro para así realizar una toma de decisiones [4], por lo que ha sido considerada una disciplina gerencial [5]. La aplicación de la AE ha sido aplicada no solo en organizaciones privadas sino también en el sector público [2, 6], porque busca trabajar desde la necesidad de la empresa la cual enfrenta un sin número de desafíos organizacionales, y que depende de la complejidad de la organización, por lo que las acciones se basan desde el diagnóstico inicial hasta la solución del requerimiento [7].

Por lo que la AE se ha convertido en un concepto práctico y aplicable que permite a las organizaciones usar las tecnologías de información de acuerdo con sus prioridades estratégicas [4]. Como lo reportado por Esquetini y Moscoso: *las organizaciones que usan AE en un 32% ha mejorado la satisfacción de sus clientes, un 28% ha reducido los costos de TI y un 27% ha logrado la estandarización y mejora de procesos* [3].

La AE es un instrumento importante para ejecutar una estrategia integrada en toda la empresa [8, 9], por lo que constituye un conjunto coherente de principios, métodos y modelos que se utilizan en el diseño y la realización de la estructura organizativa, los procesos comerciales, los sistemas de información y la infraestructura de la empresa [10]. Sin embargo, en la práctica, estos dominios a menudo no se abordan de manera integrada. Cada dominio habla su propio idioma, dibuja sus propios modelos y utiliza sus propias técnicas y herramientas, por lo que es necesario la comunicación y la toma de decisiones entre dominios que se puede ver gravemente afectada. Por lo que se han desarrollado marcos de referencia para implementar AE, a través de lenguajes de modelamiento como lo es Archimate [8].

Archimate es un lenguaje de modelamiento de AE que mediante un conjunto de símbolos y estructuras gráficas permite representar la arquitectura empresarial. Este lenguaje admite el modelado de elementos motivacionales (parte interesada, objetivo, evaluación, impulsor), elementos comerciales (actor, valor, proceso comercial, servicio comercial), elementos de aplicación (servicio de aplicación, componente de aplicación), elementos de tecnología (red, dispositivo, nodo), y elementos de implementación y migración (meseta, paquete de trabajo, brecha). Por lo tanto, a través de este lenguaje se puede moldear la estrategia de la organización, el valor que debe crear y entregar [11].

Este lenguaje tiene tres capas: capa de negocio, aplicación y tecnología, que contienen aspectos estructurales, de comportamiento e informativos, y también define las relaciones entre y dentro de las capas (núcleo, extensión de motivación, implementación y extensión de migración) [12].

Es por lo anterior que el objetivo de esta investigación fue elaborar una propuesta de AE para el producto mInstituto de la empresa Creatics, la cual se dedica al desarrollo de software. Este proceso se desarrollará a través de la identificación de las características organizacionales y la representación de sus componentes y sus relaciones de forma integral utilizando el lenguaje Archimate.

2. MÉTODO

Esta investigación tiene un alcance descriptivo, ya que plantea una propuesta y se espera que el diseño sea implementado en el futuro. Con la propuesta o aplicación de este método dentro de la empresa objeto de caso de estudio, se busca plantear estrategias a la optimización del proceso principal del negocio el cual es la gestión de la orden interna de trabajo y la alineación de este con las tecnologías de la información para incrementar la eficiencia y la competitividad de la empresa. Es así como se utilizó la metodología TOGAF, la cual es el método de desarrollo de la arquitectura ADM, que ofrece como beneficios la generación de fases de desarrollo de arquitectura: Arquitectura de negocio, arquitecturas de sistemas de información y arquitectura tecnológica, en un ciclo que sirve como una plantilla general de procesos para la actividad de desarrollo de la arquitectura y, proporciona una narrativa de cada fase de la arquitectura, describiendo la fase en términos de objetivos, enfoque, entradas, pasos a seguir, y salidas.

Las secciones de entradas y salidas proporcionan una definición de la estructura del contenido de arquitectura y entregables (una descripción detallada de las entradas de la fase y las salidas de la fase se da en el Marco de Referencia del Contenido Arquitectónico), todo esto a través de TI que permitirá incrementar la eficiencia del negocio con las operaciones de TI [13] (Figura 1).

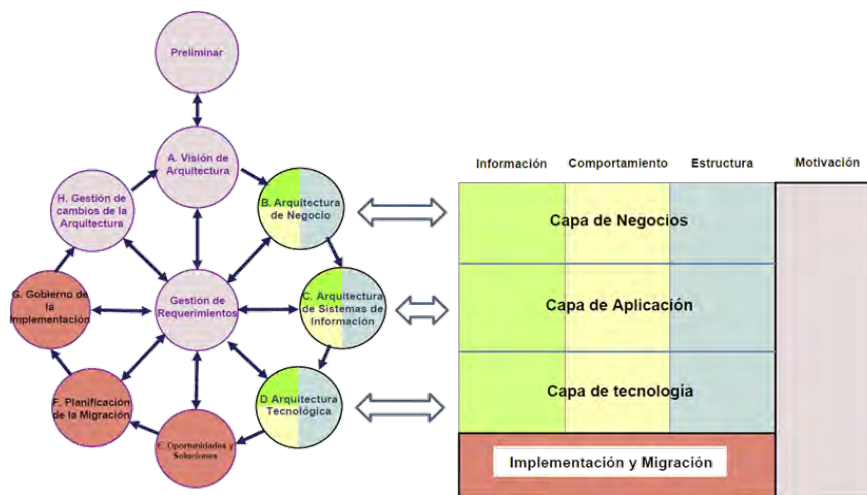


Figura 1. Metodología del estudio

Para el desarrollo de la propuesta se utilizó Coloso, que es una plataforma de desarrollo dirigida a la gestión integral del proceso de Ingeniería de Software que permite desarrollar metodologías de arquitectura empresarial. El software Coloso hace parte de un conjunto de herramientas que permiten abordar el desarrollo de software en todas sus etapas. Soporta diferentes metodologías de desarrollo generando los artefactos que aplica a cada metodología específica, permitiendo el modelamiento de arquitecturas empresariales y soporta los 25 puntos de vista del lenguaje Archimate.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Capa de Negocio

Desde el punto de vista de la organización, esta vista permite interpretar el organigrama en donde se representan los roles desempeñados en la empresa para el proceso de mInstituto, cabe resaltar la importancia de identificar los roles de la estructura organizacional y su interacción que establecerá las estrategias necesarias para controlar los procesos. Como actores se reconoce al desarrollador, el analista de pruebas y el ejecutivo comercial (Figura 2).

Desde el punto de vista cooperación del actor, para la empresa se establece una clara interacción por parte del área comercial con el cliente y retroalimentación para el equipo de proyecto, el cual se compone del área de producción, es decir, el desarrollador y el analista de pruebas, que serán los encargados de dar trámite a las solicitudes y requerimientos del cliente (Figura 3).

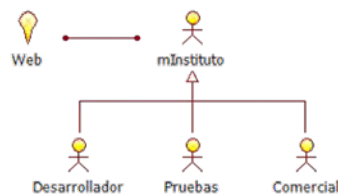


Figura 2. Modelo Punto de Vista Organización

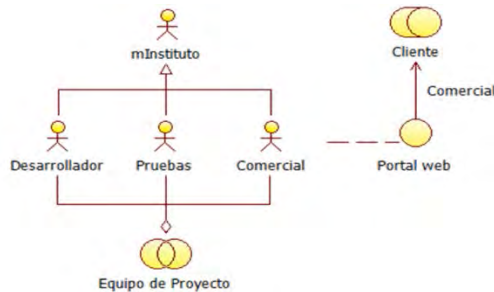


Figura 3. Modelo Punto de Vista cooperación de Actor

Al reconocer que la función principal de negocio es la comercialización de licencias de uso del software a través de la captación de clientes por medio de material publicitario y la información que se presenta en el portal empresarial, la cual ha sido desarrollada por el diseñador, el modelo que se plantea se puede ver en la Figura 4.

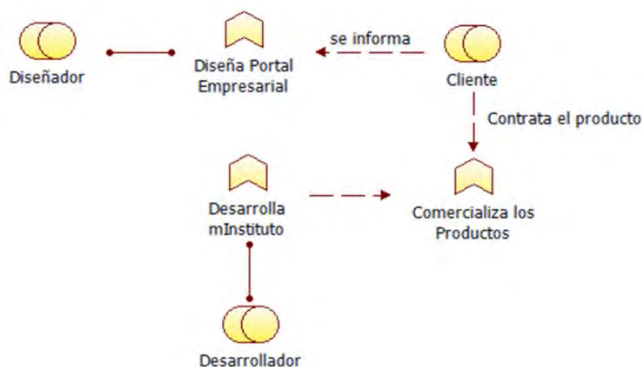


Figura 4. Modelo Punto de Vista Función de Negocio

Desde el punto de vista del proceso del negocio, se evidencia la necesidad de alinear los procesos para obtener un producto con un mayor valor agregado, para Creatics, se identifican los procesos de recepción de solicitud, firma del contrato, recepción o confirmación del pago y por último la generación de la licencia de uso y acceso a la plataforma (Figura 5).

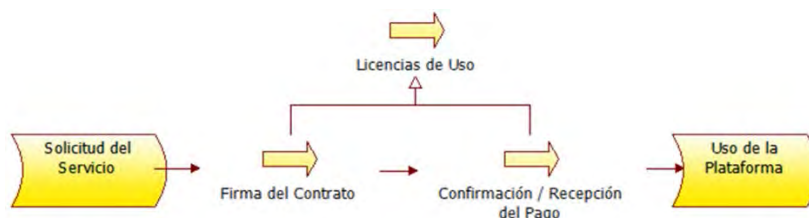


Figura 5. Modelo Punto de Vista Proceso de Negocio

En la vista de cooperación de proceso de negocio, se describe el soporte y razón de ser de mInstituto, la cual es generar soluciones tecnológicas aplicadas a la administración educativa, convirtiéndose en el objetivo estratégico de la organización. En este sentido, la plataforma web que corresponde a la ubicación del producto, es el medio que proporciona al cliente la confidencialidad, integridad y disponibilidad que su información y funciones de negocio necesitan. El acceso a la plataforma se establece a través de la generación de la licencia y en el contrato se determinan las diferentes características del producto, incluyendo actualizaciones y soporte especializado (Figura 6).

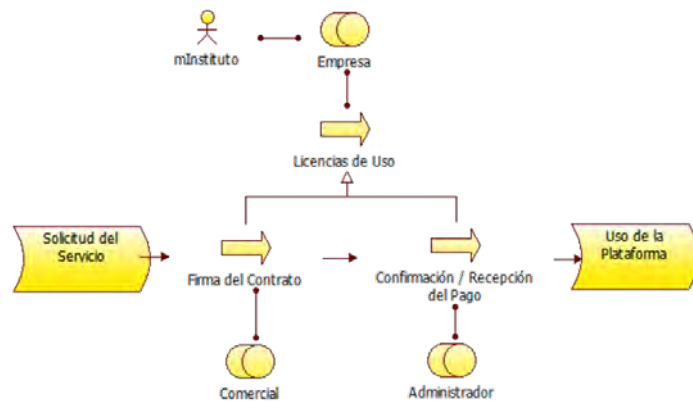


Figura 6. Modelo Punto de Vista de Producto

3.2 Capa de aplicación

En el punto de vista del comportamiento se reconoció la funcionalidad de cada componente de aplicación, y se encuentran los siguientes componentes y su funcionalidad; el licenciamiento tiene como funcionalidad permitir el acceso de los perfiles y usuarios configurados, garantizando transacciones seguras y generando los respectivos soportes contables de las transacciones. El producto tiene como funcionalidad brindar la información necesaria en cuanto a las características de este y condiciones de adquisición, además incluye las respectivas actualizaciones del sistema.

La comunidad tiene como funcionalidad proveer de herramientas de comunicación entre grupos de estudiantes, así como enlazar la comunicación con las redes sociales. Y el componente de publicidad tiene como funcionalidad ampliar la participación en el mercado a través de las estrategias de marketing que se utilicen. En la Figura 7 se describe el mecanismo de comunicación entre los componentes, se define como componente central mInstituto siendo el más importante en el cumplimiento de la misión de la organización, la comunicación de éste con los demás componentes se genera a través de interfaces.

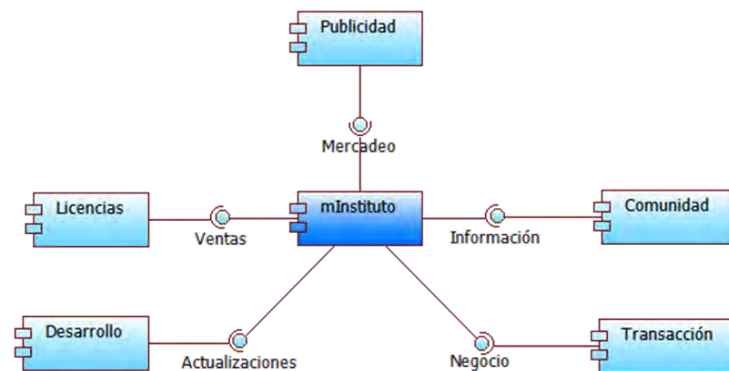


Figura 7. Modelo punto de vista estructura de aplicación

El siguiente paso después de determinar los servicios de aplicación fundamentales para el proceso de negocio, los cuales son el desarrollo de la aplicación y la generación de las licencias, se planteó el modelo de desarrollo. Entre los servicios se encuentra la generación de licencias, la cual incluye los servicios de acceso a la aplicación y la realización de los pagos utilizando el componente de transacciones.

Por otro lado, el desarrollo de aplicación incluye las mejoras y actualizaciones utilizando el componente de desarrollo. Los dos procesos generados en la capa de aplicación están directamente relacionados con el cliente y pertenecen a los procesos misionales. Por una parte, el cliente obtiene el acceso al software y por el otro a las actualizaciones del mismo (Figura 8).

En esta fase, se analizó la infraestructura para el aplicativo mInstituto, la cual está basada en un portal comercial que se ejecuta sobre un servidor de páginas web y necesitará de un hosting que cumpla las restricciones de costos y a su vez lleve la menor cantidad de soporte a nivel de seguridad ya que la

funcionalidad principal es la de ofrecer información sobre los productos de la organización y realizar actualizaciones que no van más allá de noticias relacionadas con la empresa, producto o el medio en el que se desenvuelve.

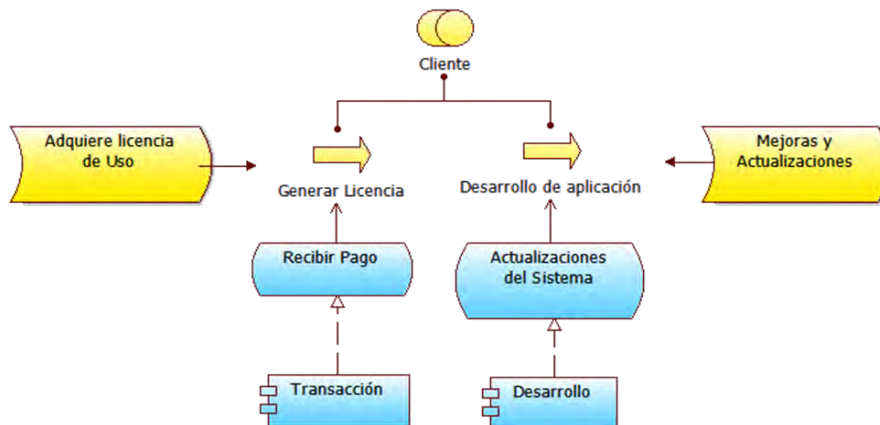


Figura 8. Modelo punto de vista de Uso de Aplicación

El aplicativo estará hospedado en un proveedor de servicios que responda con las necesidades de base de datos, así como la demanda de consulta de todos los módulos. La comunicación se realizará a través del proveedor de servicios de Internet contratado por el cliente, utilizando la red y equipos de propiedad del cliente en su respectiva localización.

El servidor de la página web está destinado a la parte comercial de la empresa, tiene como principales componentes la administración de parte de las estrategias de mercadeo y publicidad y por otro lado, se encuentra el acceso a una comunidad basada en redes sociales; este a su vez se comunica con el servidor de aplicaciones a través del punto de acceso o pantalla de ingreso donde los clientes accederán a la aplicación de mInstituto, el aplicativo posee herramientas de accesibilidad para los usuarios y perfiles autorizados y tiene incluido un módulo de transacciones y pagos el cual cuenta con el nivel de seguridad informática acorde a las necesidades de la información.

En este punto de vista observamos que mInstituto utiliza un servidor Linux y sobre este se ejecuta el código Java utilizando su máquina virtual y conectado a una base de datos postgreSQL (Figura 9).

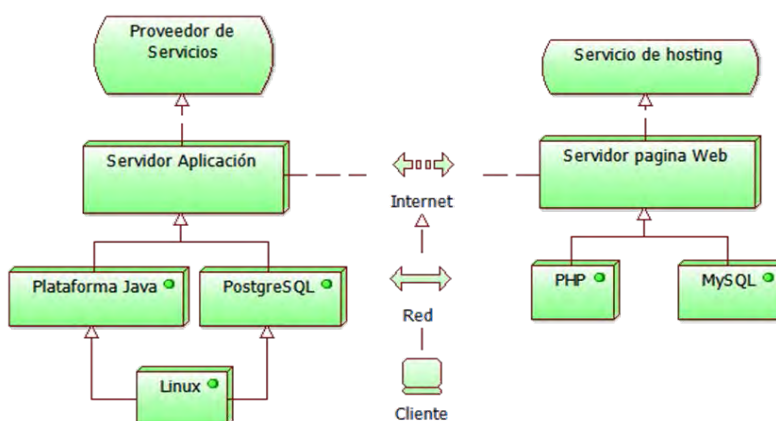


Figura 9. Modelo punto de vista de organización e implementación: mInstituto

En la Figura 10 se puede observar el modelo del producto que obtiene el cliente luego de un licenciamiento. Como punto de partida se establece la comercialización que iniciará con una orden de compra y la aceptación de los términos y condiciones de uso de la plataforma, el cliente recibirá mes a mes su facturación a través del gestor contable.

Software: mInstituto con todas las funcionalidades descritas en los términos y condiciones. Soporte: esa necesidad vital del ciclo del software que permite al aplicativo crecer por medio de la retroalimentación y

generar comunicación y confianza a los clientes a través de un excelente servicio post-venta, manejado por un gestor de clientes que recibirá todas las solicitudes en diferentes escalas y serán gestionadas por los profesionales de las diferentes áreas.

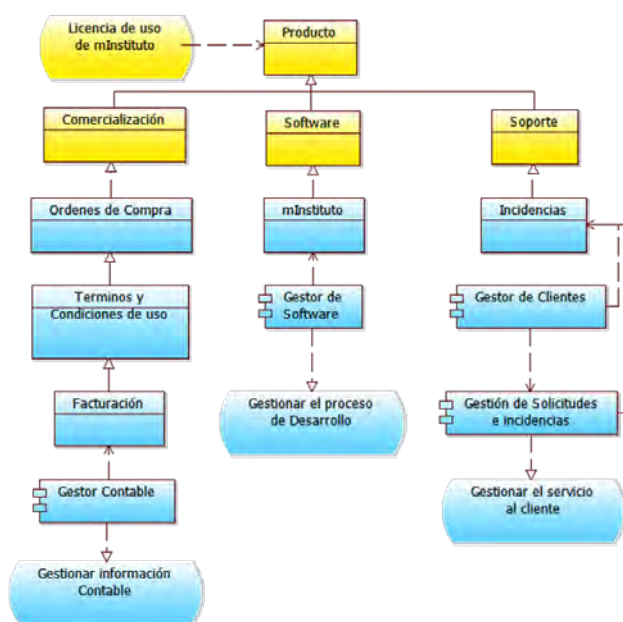


Figura 10. Modelo punto de vista de estructura de realización del servicio: mInstituto

3.3 Capa de tecnología

Después de la información recopilada en las capas anteriores, como la identificación del objetivo de negocio principal el cual es proveer soluciones tecnológicas que permitan optimizar la gestión de la información en las instituciones educativas, a este objetivo se le asoció los roles principales de negocio, es decir, el desarrollador y el cliente. El paquete de trabajo unido al objetivo corresponde al desarrollo de la solución tecnológica (Figura 11).

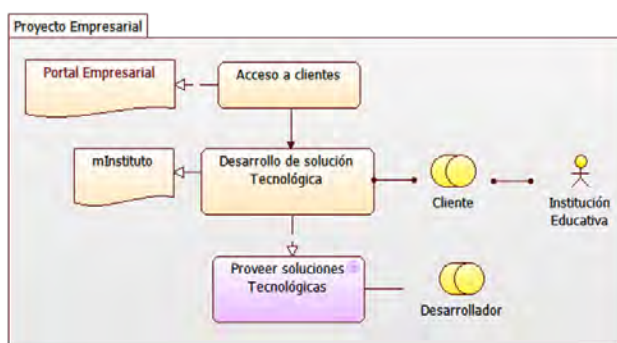


Figura 11. Modelo punto de vista del proyecto

Se identificaron las plateas y brechas evidenciadas para el proyecto. En primer lugar, los requerimientos de la gestión de información de las instituciones educativas; en segundo lugar, fue el análisis y diseño, la brecha que se reconoció fue el levantamiento de requerimientos, el cual se realiza con la información obtenida de los requerimientos. La tercera platea corresponde al licenciamiento y la brecha entre análisis y diseño y el licenciamiento es el proceso de desarrollo del software y las pruebas correspondientes.

De esta manera, se generó un paquete de trabajo que es el desarrollo de la solución tecnológica, su objetivo es proveer soluciones tecnológicas de gestión de información de las instituciones educativas, para el cumplimiento del objetivo se identificaron instrumentos puntuales que permiten su ejecución los cuales son, requerimientos específicos del negocio, análisis y diseño y el licenciamiento con sus respectivas brechas. Se identificó como punto de unión entre los modelos de migración y proyecto el software con los requerimientos de la gestión de información de las instituciones educativas (Figura 12).

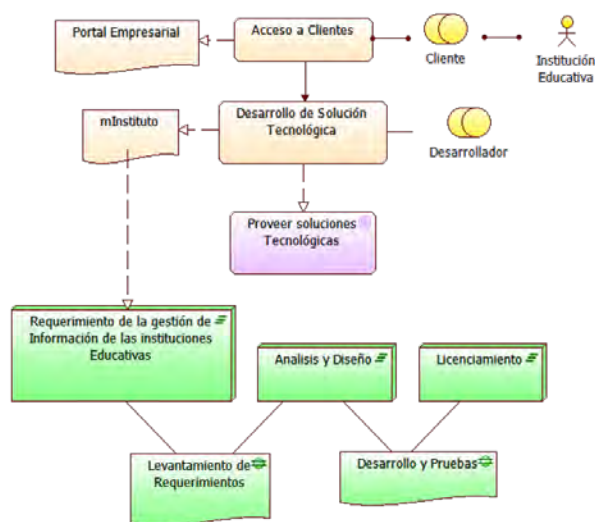


Figura 12. Modelo punto de vista de la implementación y migración

4. CONCLUSIONES

Se evidenció que Archimate fue un lenguaje apropiado a las necesidades de identificación de factores y relaciones entre los mismos para el desarrollo de la arquitectura empresarial ya que a través de las diferentes capas que se propusieron se logró abarcar todos los procesos y alinearlos con la filosofía organizacional. La alineación de todos los procesos con los objetivos estratégicos permite que las políticas y planes de acción generados en los procesos estratégicos y de apoyo tengan el mismo horizonte que los procesos misionales.

La arquitectura empresarial permite definir el estado ideal en el que se desea que se encuentre la organización, contribuyendo a la generación de una planeación estratégica con bases realmente sólidas que garantice que la organización cumple las expectativas y requerimientos de las instituciones educativas en cuanto a necesidades de gestión y se encuentra en capacidad de responder acertadamente a los cambios que se presentan.

Con el desarrollo del proyecto, el siguiente paso para la empresa Creatics se centrará en la realización de un estudio de factibilidad del proyecto de diseño y desarrollo del software en donde se tendrán en cuenta variables económicas y otras variables influyentes como lo es el estudio de mercados. Posterior al estudio de factibilidad se procederá a realizar el diseño y desarrollo de la solución tecnológica que permita optimizar la gestión de la información en las instituciones educativas, este desarrollo de software tendrá como base y fundamento la arquitectura empresarial propuesta para la empresa y la aplicación de los patrones necesarios.

REFERENCIAS

- [1] Martínez A. et al. (2015). Una aproximación hacia la evaluación del nivel de madurez de la arquitectura empresarial. Revista Cubana de Ingeniería 6(3), 33-42.
- [2] Serna M. et al. (2010). Arquitectura empresarial. Una visión general. Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín 9(16), 101-112.
- [3] Cáceres C. y Moscoso O. (2014). Propuesta de un marco de referencia de gestión de organizaciones usando Arquitectura Empresarial. Enfoque UTE 5(4), 70-88.
- [4] Bricknal R. et al. (2011). Enterprise Architecture: Critical Factors affecting modelling and management. Recuperado: http://pdf.aminer.org/000/245/735/enterprise_architecting_critical_problems.pdf
- [5] Iacob M. et al. (2012). Delivering Enterprise Architecture with TOGAF® and ARCHIMATE®. BIZZdesign.
- [6] Arango M. et al. (2014). Enterprise architecture as tool for managing operational complexity in organizations. Dyna 81(185), 227-234.
- [7] Harrell J. y Sage A. (2010). Enterprise architecture and the ways of wickedness. Information Knowledge Systems Management 9(3-4), 197-209.
- [8] Lankhorst M. et al. (2009). The architecture of the archimate language. In Enterprise, business-process and information systems modeling. Springer.

- [9] Josey A. et al. (2016). An introduction to the ArchiMate® 3.0 specification. White Paper from The Open Group.
- [10] Aier S. (2014) The role of organizational culture for grounding, management, guidance and effectiveness of Enterprise architecture principles. *Information Systems and E-Business Management* 12(1), 43-70.
- [11] Aldea A. et al. (2015). Modelling value with archimate. En *International Conference on Advanced Information Systems Engineering*.
- [12] Azevedo C. et al. (2013). An ontology-based well-founded proposal for modeling resources and capabilities in ArchiMate. En *17th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference*.
- [13] Canabal R. et al. (2017). Aplicación de un esquema de arquitectura empresarial (TOGAF) para una pequeña empresa (PYME) utilizando aplicaciones colaborativas de Google. *Información tecnológica* 28(4), 85-92.

RecordaMedic: Una aplicación móvil para la supervisión en la toma de medicamentos de los adultos mayores

Jhon Freddy Hernández Corzo¹
Alexandra María Silva Monsalve²
Universidad Santo Tomás.
Colombia

Este capítulo se orienta en la construcción de una aplicación móvil para la supervisión en la toma de medicamentos de adultos mayores. Se identifica en la población adulta mayor el problema de la pérdida de memoria, un fenómeno que se presenta durante el proceso natural de envejecimiento. Metodológicamente se abordó una investigación exploratoria para el reconocimiento de las aplicaciones informáticas similares y se implementó la metodología Kanban para la construcción de la aplicación. Los resultados permitieron identificar aspectos relevantes que aportaron en el desarrollo del prototipo para la supervisión en la toma de medicamentos.

¹ Estudiante de Ingeniería Informática.
Contacto: jhonhernandezc@ustadistancia.edu.co
² Doctora en Educación.
Contacto: alexandrasilva@ustadistancia.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El envejecimiento en la población mundial es acelerado, los cambios fisiológicos asociados al envejecimiento deben ser reconocidos para entender las limitaciones de los adultos mayores. Los adultos mayores sufren cambios morfológicos y funcionales en su organismo asociados al envejecimiento relacionados con su sistema cardiovascular, renal, nervioso central, muscular y metabolismo de la glucosa. Respecto con el envejecimiento cerebral, la memoria y la atención, se constituyen en las habilidades ejecutivas más afectadas. Existen diferentes tipos de memoria disponible en [1], entre estas: memoria a corto plazo, memoria a largo plazo, memoria de trabajo, entre otras, tal como se representa en la Figura 1.

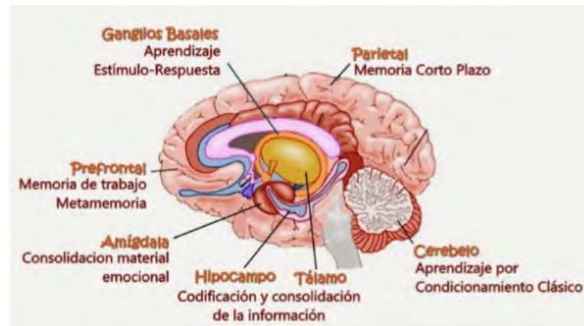


Figura 1. Estructuras del cerebro implicadas en el aprendizaje

En cuanto a la memoria de corto plazo, presenta deterioros con la edad asociados al envejecimiento, y a los cambios degenerativos y funcionales que presenta la corteza prefrontal. La memoria de largo plazo y la memoria semántica se conservan durante el envejecimiento, y se disminuye la memoria episódica (memoria a largo plazo asociada a lo vivido y su contexto). No obstante, actualmente es aceptado que, en el cerebro adulto, incluyendo el humano, se produce la neurogénesis, proceso desarrollado a lo largo de la vida, la cual ocurre en áreas particulares del cerebro como la región subventricular y el hipocampo, siendo fundamentales en el aprendizaje y la memoria. Sin embargo, algunas enfermedades neurodegenerativas alteran la neurogénesis [2].

Estas dificultades cognitivas en adultos mayores generan algunas limitaciones en las actividades diarias, un ejemplo se puede ver en la toma de medicamentos, que en casos extremos pueden generar sobredosis en la ingesta de los fármacos. Adicionalmente, la edad avanzada va ligada al aumento de enfermedades, que pueden ser crónicas o con limitaciones funcionales. La población más afectada es la del adulto mayor porque presentan un consumo simultáneo de varios medicamentos [3].

En un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud OMS, la polifarmacia o uso simultáneo de múltiples medicamentos se hace más visible en los adultos mayores. Generalmente se evidencia, el consumo de cinco o más medicamentos, a esto se le suma el constante problema de no seguir al pie de la letra las recomendaciones médicas, además de errores en la toma de medicación. Al respecto, se estima que los adultos mayores solo consumen un tercio del total de los fármacos que le fueron prescritos, por lo que se hace necesario que el consumo de medicamentos en personas mayores se aborde como un problema de salud pública [3].

Por otra parte existe la posibilidad de presentarse un abuso en la toma de medicamentos recetados, esto generalmente se da por accidente lo que puede ocasionar graves consecuencias que van desde adicción en el caso de los opioides (utilizados para controlar el dolor) y benzodiazepinas (utilizados para tratar la ansiedad) hasta sobredosis o causar efectos secundarios dañinos, ya que la mayoría de medicamentos que se recetan son seguros además de eficaces siempre y cuando se sigan al pie de la letra las instrucciones del médico de como tomarlos [4].

Teniendo en cuenta algunos estudios, en los cuales se investigó la razón por la que se olvidaba la toma de medicamentos, se encontró que, a raíz de la gran cantidad de medicamentos formulados, se hacía un poco complejo saber los que se habían consumido. Sumado, a la complejidad de las recetas médicas, para saber exactamente las dosis y las horas en que se debían tomar los medicamentos.

Existe una cantidad considerable de aplicaciones que le recuerdan al adulto mayor la hora exacta en que debe tomar su medicamento, sin embargo, se encontró que en su mayoría tienen un costo, además de estar limitados a un recordatorio de máximo 12 horas y no permiten la monitorización por parte de un familiar. En la revisión de este tipo de aplicaciones, se identifica que las gratuitas son limitadas en algunas funcionalidades, entre estas, la monitorización del paciente por parte de un familiar o tercero. De acuerdo con la problemática presentada, a partir de esto se propone el desarrollo de una aplicación móvil, que recuerde al adulto mayor cuando debe tomar sus medicinas, y también que permita el monitoreo de estos recordatorios y la programación de recordatorios cada 24 horas.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Pérdida de memoria

Esta se define como el olvido inusual donde posiblemente no se pueden recordar sucesos nuevos o recordar sucesos pasados o por el contrario ninguno de los dos [5]. Existen tres tipos de pérdida de memoria: 1) el primer grupo hace referencia a la memoria y el envejecimiento, allí se define que la pérdida de memoria tiene una relación directa con la edad, esta pérdida de memoria aumenta a medida que aumenta la edad; 2) un segundo grupo se centra en la demencia, allí se relaciona la pérdida de memoria con síntomas que pueden estar ligados al razonamiento, juicio, lenguaje y otras habilidades relacionadas con el pensamiento; 3) finalmente tenemos un último grupo llamado deterioro cognitivo y leve el cual se puede definir como el punto medio entre los dos anteriores, que puede estar dada por el envejecimiento del adulto mayor sin embargo en el mejor de los casos no se alcanza la etapa anterior que se denomina como demencia [5].

Para esta investigación se tomaron en cuenta dos de los tipos de pérdida de memoria anteriormente mencionados aspectos como la memoria y el envejecimiento, así como el deterioro cognitivo, tres aspectos relevantes que se deben tener en cuenta como las razones por las que el adulto mayor presenta una pérdida de memoria. Ahora bien, es importante tener en cuenta, el Vademecum, autores como Galeano y Rodríguez [6] definen este término como el texto que recopila la información de todos los medicamentos que están disponibles tanto en el país como a nivel mundial en periodo determinado, ya que este se actualiza cada año. Aunque está dirigido a médicos, farmacéuticos y odontólogos, personal propio de salud. Esta también puede ser consultada por público en general. El comprender esta definición toma gran relevancia en la investigación, ya que esta información nos va a permitir clasificar los tipos de medicamentos que registre el adulto mayor.

2.2 Aplicación móvil

Para poder hablar de la historia o los inicios de las aplicaciones móviles es necesario que remontarnos a los años 90. Donde las primeras aplicaciones enfocadas a servir como agendas para guardar contactos, se contaba con editores de tonos de llamada por lo que ya no necesitábamos memorizar los números telefónicos por el contrario el móvil lo haría por nosotros [7]. Existen tres tipos de aplicaciones móviles: 1) el primer grupo son las aplicaciones nativas, las cuales son aplicaciones que se desarrollan sobre un único sistema operativo móvil; 2) un segundo grupo se denominan aplicaciones *web*, las cuales se diferencian del primer grupo ya que estas solo funcionan por medio de navegadores *web*; 3) un tercer grupo que se conoce como aplicaciones híbridas, estas son el resultado de las dos aplicaciones anteriormente definidas, por ser desarrolladas en un único código se puede ejecutar en diferentes sistemas operativos [8].

Aunque existen otras aplicaciones que permiten recordar la toma de medicamentos [18] haciendo uso de aplicaciones móviles, también con la integración de horarios para la toma [19, 20], la propuesta de la aplicación RecordMedic integra algunos componentes que hacen amigable e intuitiva su utilización.

Para el enfoque de este desarrollo se optó por centrarse en el desarrollo de una aplicación nativa, específicamente para el sistema operativo *Android*. Una de sus grandes ventajas es que se aprovecha al máximo las capacidades, además de configuraciones predefinidas en el dispositivo móvil. En la figura 2 se muestran las principales ventajas y desventajas de las aplicaciones nativas.

Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tienen acceso directo al sistema operativo a utilidades del teléfono como su almacenamiento, cámara, GPS, etc. • Estas no requieren de una conexión a internet para ser ejecutadas • Se distribuyen directamente desde el App store del fabricante lo que la hace más visible para su distribución.
Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Solo se pueden utilizar en el Sistema Operativo para el que se desarrolló. • Se requiere de un proceso de aprobación para que la App store publique la aplicación. • Se requiere de conocimientos previos de la plataforma para hacer el desarrollo.

Figura 2. Ventajas y Desventajas de las aplicaciones nativas [6]

Se seleccionó una aplicación móvil por las características [9] de usabilidad y flexibilidad que poseen las aplicaciones móviles, en este aspecto los atributos no funcionales como portabilidad y accesibilidad permiten que sea conveniente para el desarrollo de la aplicación. Por otra parte, la implementación de tecnologías en las diversas áreas del conocimiento [10], ha aportado en la resolución de las problemáticas de la actual sociedad [11].

3. MÉTODO

Para este proyecto se definió una metodología de investigación exploratoria, para la cual se indagó en varias fuentes, se encontró que existen muchas aplicaciones móviles en el área, pero que no reúnen las condiciones requeridas que se determinaron para este estudio, como lo son el licenciamiento y el monitoreo. Para el desarrollo ingenieril de este proyecto, se eligió la metodología *Kanban*, que surge a partir de las ideas del vicepresidente de Toyota Motor Taiichi Ohno, quien postulo los conceptos de *Just and time* definido como justo a tiempo y *Kanban*, la mejora no debe parar nunca. Allí se hace la alusión al Samurái donde el guerrero (directivo) nunca termina de perfeccionar su estilo (mejorar la habilidad para la dirección) y nunca para de pulir su espada (de mejorar el proceso y el producto) [12].

Surge en los años 40 para posteriormente ser implementado en los sistemas de producción de Toyota, esto permitió la visualización de los procesos de producción por medio de la aplicación de Kanban, consiguiendo entregas a tiempo, entregas en el momento preciso, lo que evitaba la sobreproducción además de almacenamiento de productos innecesarios [13]. El método Kanban es un concepto de origen Japones que tiene como significado señalar de forma visual, por medio de tarjetas las cuales pueden contener bloque de colores o *post-its* lo que permite un control, así como la gestión de los flujos de producción, lo que permite realizar un seguimiento a la ejecución, así como procesos organizacionales [14]. Su objetivo principal es gestionar de forma general la complejidad de las tareas y cuenta con las siguientes características:

- Fácil de utilizar actualizar y asumir por parte del equipo
- Es una técnica de gestión de tareas muy visual
- Permite ver el estado de los proyectos
- Permite pautar el desarrollo de trabajo de manera muy efectiva

3.1 Funcionamiento de la metodología Kanban

Su metodología es muy sencilla, además de contar con la opción de que se puede actualizar y permitir que el equipo de trabajo la pueda asumir sin problema, una de sus grandes ventajas es que posee un método visual permite que a golpe de vista se conozca el estado de los proyectos además de la asignación de nuevas tareas de forma más efectiva, sin embargo, para su aplicación se hace necesario contar con un tablero de tareas para mejorar el trabajo y llevar las tareas a un ritmo sostenible[13]. A continuación, en la Figura 3 se detallan los principios que describen la metodología Kanban.

3.1.1 Definición del flujo de trabajo del proyecto

En esta fase se inicia con la creación del tablero Kanban con columnas, las cuales representaran cada fase del proyecto. Por lo que cada columna representará una fase o tarea del flujo de trabajo del proyecto, lo

que permitirá una visualización oportuna por cada uno de los integrantes del equipo de desarrollo. El número de columnas deberá ser igual al de fases definidas para el proyecto, sin embargo, se podrá definir el número de fases de acuerdo con el número de tareas que se tienen para iniciar y finalizar el proyecto.



Figura 2. Principios de la metodología Kanban

3.1.2 Visualizar las fases del ciclo del proyecto

En Kanban el trabajo estará dividido por diferentes fases con el objetivo de agilizar el flujo de trabajo. Cada una de las tareas será escrita en un *post-its*, en los cuales se mostrará información básica como la descripción de la tarea, la estimación de horas, así como personal asignado para llevarla a cabo, en resumen, datos necesarios para que el equipo de programación pueda conocer que se debe hacer en cada tarea. También se podrán agregar fotos con respecto a los responsables, así como tarjetas con distintas formas definiendo observaciones o bloqueos que se estuvieran presentando en el momento. Como resumen en esta fase se buscará que las tarjetas sean ubicadas además de puestas representando adecuadamente las tareas para permitir una visualización clara, así como un fácil entendimiento de las tareas asignadas además de las prioridades así metas definidas, por parte de cada uno de los miembros del proyecto.

3.1.3 Stop Starting, start finishing

El lema emblemático de Kanban -Deja de empezar y empieza a terminar-. Por lo que para esta fase se le dará prioridad al trabajo que está en curso antes de empezar con nuevas tareas, este trabajo en curso será limitado por una cantidad máxima de tareas permitidas en cada fase. Esta fase implicará una definición máxima de tareas que se podrán definir en cada fase del proyecto. Por ejemplo: Se definirán dos tareas para la fase de diseño, tres para la fase de desarrollo y una para la fase de pruebas, lo que definirá una restricción sobre el trabajo que se está desarrollando.

3.1.4 Control del Flujo de Trabajo

La metodología Kanban busca mantener a los miembros del proyecto con un flujo constante de trabajo por lo que esta permitirá mezclar tareas y proyectos. Se tendrán las tareas más importantes en cola o en espera para que sean desarrolladas, el seguimiento del trabajo será de forma pasiva, buscando no interrumpir de forma constante a los miembros del equipo, y cada tarea terminada será almacenada en una tarjeta donde se podrá hacer seguimiento del trabajo que ya se realizó [13].

3.2 Desarrollo de la aplicación implementando Kanban

3.2.1 Historias de usuario

La Figura 3 presenta la historia de usuario mediante la que se identificaron los requerimientos para la creación de la interfaz que da acceso a la aplicación.

En la Figura 4 se complementan los requerimientos en la creación de usuarios en lo relacionado con el cambio de contraseña, para lo cual se configuro que el cambio o modificación de la contraseña pueda reestablecerse por medio del correo.

La Figura 5 identifica la historia de usuario con los requerimientos para la gestión de las alarmas, estas relacionadas con la creación, modificación y gestión de alarmas.

HISTORIA USUARIO		HU01 – AUTENTICACION USUARIO
Como: Usuario		
Quiero: Iniciar sesión		
para poder: Para navegar por las diferentes opciones que me brinda la aplicación		
Validación:	Ingreso de usuario y contraseña por Parte del usuario	Valor: Prioridad: Estimación:

Figura 3. Historias de usuario

HISTORIA USUARIO		HU02 – MODIFICACION CONTRASEÑA
Como: Usuario		
Quiero: Modificar contraseña		
para poder: Cambiar mi contraseña		
Validación:	Ingreso de usuario y asignación de nueva contraseña	Valor: Prioridad: Estimación:

Figura 4. Historias de usuario 2

HISTORIA USUARIO		HU03 – CONSULTA DE ALARMAS EN TOMA DE MEDICAMENTOS
Como: Usuario		
Quiero: Consultar mis alarmas		
para poder: Ver alarmas configuradas		
Validación:	Ingreso de usuario para ver listado de alarmas configuradas	Valor: Prioridad: Estimación:

Figura 5. Historias de usuario 3

Seguidamente, en la Figura 6 se presenta la historia de usuario relacionada con la consulta de tiempo restante para la toma de medicamentos. En esta se presentan los requerimientos necesarios para la ejecución de este proceso. En la Figura 7 se identifican los requerimientos de la historia de usuario para el proceso de cancelación de la toma de medicamento, que permite al usuario los procesos de cancelación o eliminación de la toma del medicamento.

HISTORIA USUARIO		HU04 – CONSULTA TIEMPO RESTANTE PARA TOMA SIGUIENTE MEDICAMENTO
Como: Usuario		
Quiero: Consultar tiempo del siguiente medicamento		
para poder: Conocer la hora en que debo tomar el medicamento		
Validación:	Ingreso de usuario a la sección listado de medicamentos	Valor: Prioridad: Estimación:

Figura 6. Historias de usuario 4

HISTORIA USUARIO		HU05 – CANCELACION TOMA MEDICAMENTO
Como: Usuario		
Quiero: Cancelar toma medicamento		
para poder: Eliminar la toma de medicamento programada		
Validación:	Ingreso de usuario y consulta de listado de medicamentos	Valor: Prioridad: Estimación:

Figura 7. Historias de usuario 5

3.3 Aplicación de Kanban

A continuación, se presentan la descripción de las actividades adelantadas en la construcción de la aplicación.

3.3.1 Descripción de las actividades

Kanban se priorizan las actividades (sprint) por urgencia o necesidad. La Figura 8 describe los backlogs que se gestionaron para la ejecución del proyecto, entre estos: levantamiento de requerimientos, desarrollo de la aplicación, construcción de la base de datos, ingreso, manuales del usuario y del sistema.



Figura 8. Actividades [15]

3.3.2 Flujo de trabajo o iteración

En la Figura 9 se detalla el flujo y la iteración de las actividades de acuerdo con Kanban [15].



Figura 9. Flujo de trabajo

2.3.3 Fases del Ciclo de desarrollo (producción)

- *Backlog*: en esta fase se especificarán todas las actividades que serán parte de los sprint (entregables) estos serán clasificados de acuerdo con su prioridad y necesidad, donde se iniciara desarrollando el de mayor prioridad.
- *Actividades diarias* (To Do - Para Hacer): para esta fase toma gran relevancia el tamaño del equipo (Team Developer) así como su experiencia para el desarrollo de las actividades designadas, logrando así un control en el número de horas laboradas por día, según el tiempo que estas demanden. Sin embargo, se resalta que estas actividades deben ser muy puntuales y no puede tener un tiempo prolongado una vez realizan las respectivas pruebas como se detalla en la Figura 10.
- *Progreso* (Doing - Haciendo): en esta fase las actividades que fueron terminadas en la etapa anterior (Actividades Diarias) y una vez se culminan las pruebas respectivas, se continúa el flujo de trabajo pasando a la siguiente etapa (Figura 11).



Figura 10. Actividades Diarias [15]

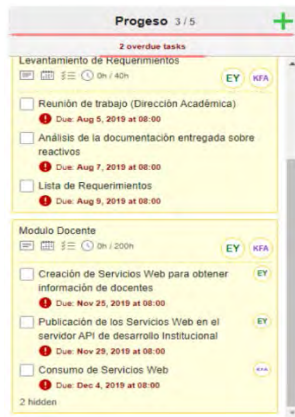


Figura 11. Actividades en Progreso [15]

- Actividades Finalizadas (Done - Hecho):** para llegar a esta fase es necesario que las actividades anteriores cumplan a cabalidad con todas las funcionalidades en cada una de las etapas anteriormente mencionadas como se evidencia en la Figura 12, en la cual se observan las actividades finalizadas.

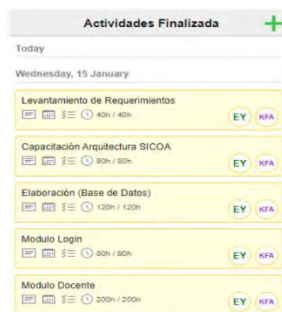


Figura 13. Actividades Finalizada [15]

- Deja de Empezar y Empieza a terminar (Stop Starting, start finishing):** Uno de los principios fundamentales de la Metodología Kanban en el cual se muestra por medio de un tablero las actividades pendientes, donde no es posible pasar de una actividad a otra si el código no ha sido depurado correctamente y se cumple con la funcionalidad requerida. En la figura 14 se puede identificar uno de los tableros que según la metodología Kanban permiten el control y gestión de las actividades

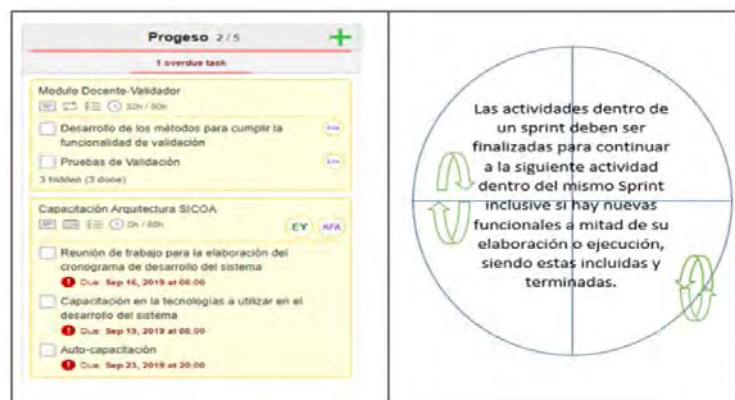


Figura 14. Iteración en el Progreso [15]

Al ser una metodología completamente visual Kanban permite hacer un control del progreso del proyecto, lo que permite evitar la acumulación de varias actividades pendientes a lo que se le conoce como cuello de botella. En la figura 15 se puede visualizar todas las actividades diarias, así como las que se encontraban pendientes, lo que retraso y dificulto el progreso del presente proyecto.

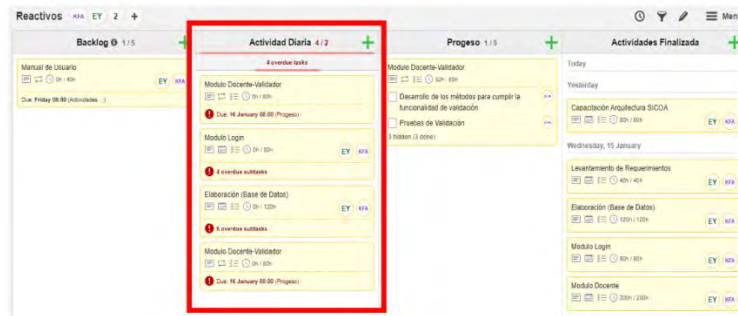


Figura 15. Control Entre Actividades [15]

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La interfaz de usuario juega un papel fundamental en lo que respecta a la presentación que se dará de la aplicación final, se buscará su aceptación brindando una aplicación intuitiva con interfaz de usuario amigable y de fácil utilización [17]. A continuación, se despliegan las interfaces que conforman la aplicación móvil para la monitorización en la toma de medicamentos de adultos mayores << RecordaMedic >>. En la Figura 16 se identifica el acceso y menú principal de la aplicación << RecordaMedic >>.

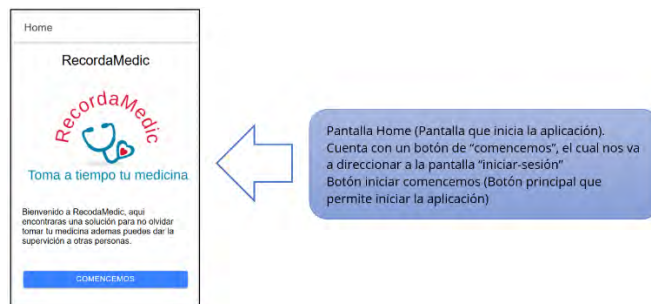


Figura 16. Menú de inicio de la App RecordaMedic

Para ingresar es necesario realizar registro en la aplicación creando usuario y contraseña como se visualiza en la Figura 17.

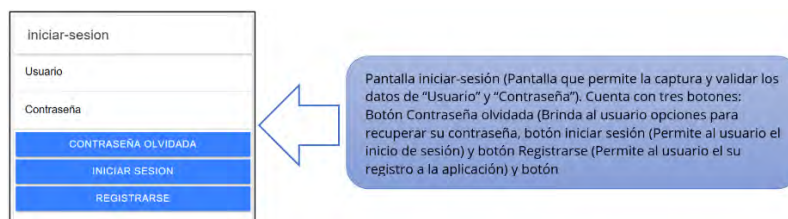


Figura 17. Interfaz de cambio de contraseña

Adicionalmente la aplicación permite al usuario realizar recordatorio de contraseña olvidada como se presenta en la Figura 18.

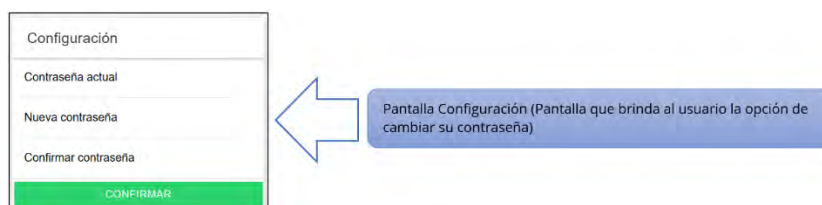


Figura 18. Opción de confirmación y cambio de contraseña

También permite configurar los perfiles de usuario y los roles disponibles en la aplicación como se presenta a continuación. Los perfiles de usuario se orientan hacia el adulto mayor que debe tomar los medicamentos, y también al cuidador, en el caso que el adulto no tenga la capacidad cognitiva de gestionar la aplicación como se observa en la Figura 19.

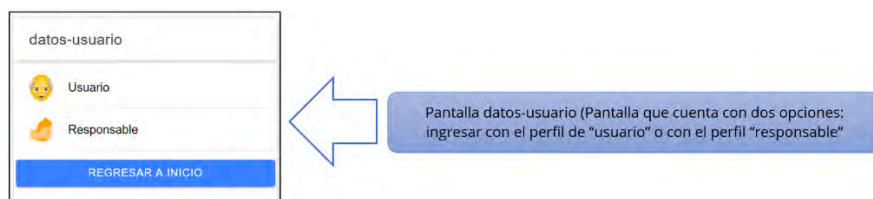


Figura 19. Interfaz de configuración de perfil

A continuación, en la Figura 20 se despliegan los apartados de la aplicación << RecordaMedic>>, se identifican: Lista de medicamentos, Programar recordatorio y Medicamentos.

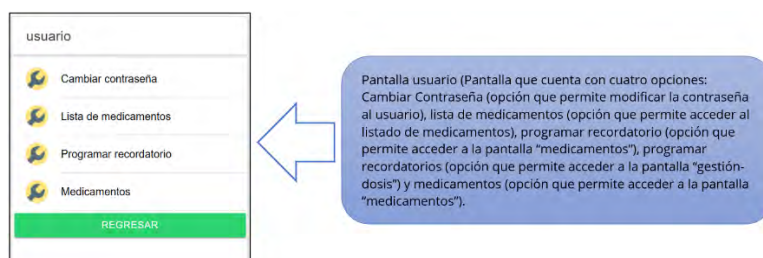


Figura 20. Interfaz de las opciones de la aplicación << RecordaMedic>>

Seguidamente se presenta la sección de lista de medicamentos, la cual permite adicionar, modificar o eliminar medicamentos como se presenta en la Figura 21.

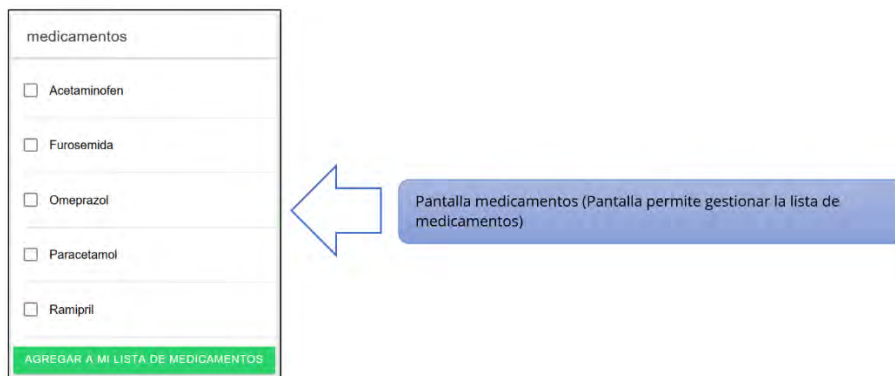


Figura 21. Interfaz de la aplicación para gestionar los medicamentos << RecordaMedic>>

A continuación, en la Figura 22 se despliega la interfaz que permite la gestión de los medicamentos, la cual se orienta en procesos como configurar las dosis, la hora y el límite de días para cada medicamento.



Figura 22. Interfaz de la gestión de los medicamentos << RecordaMedic>>

Adicionalmente, el adulto mayor por medio de la aplicación puede activar o desactivar un recordatorio de toma del medicamento, el cual envía un mensaje al correo electrónico del usuario que se registró al iniciar la App.

4. CONCLUSIONES

La construcción del prototipo RecordaMedic permitió evidenciar los requerimientos necesarios identificados en las necesidades de los adultos mayores para la toma de medicamentos, observándose en sus secciones la respuesta en la gestión y monitoreo en la toma de medicamentos según los tiempos y fechas de acuerdo con las indicaciones del médico tratante. Aunque en la revisión del estado del arte, se pudo identificar que existen en el mercado otros tipos de aplicaciones, la que se presenta en este proyecto de investigación incorpora nuevas funcionalidades que beneficiaran tanto al adulto mayor como al cuidador o tercero encargado de gestionar la aplicación.

También, se evidencia como la tecnología aporta en la calidad de vida de los adultos mayores permitiendo recordar en la toma de medicamentos, o por la colaboración de un tercero, que se puede considerar como el cuidador. En la construcción de la APP mediante la metodología Kanban se implementó un proceso organizado que permito llevar paso a paso la identificación de los requerimientos dando cumplimiento a lo dispuesto en la construcción de la aplicación móvil para la supervisión en la toma de medicamentos de adultos mayores RecordaMedic.

Es importante destacar que las aplicaciones móviles han venido incursionando en diferentes áreas, las cuales se proyectan como herramientas que pueden apoyar diversas actividades, ya sean de uso profesional, laboral o personal, teniendo en cuenta la actual sociedad del conocimiento que permea todas las áreas disciplinares [16]. Las APP tienen una ventaja frente a otras aplicaciones o desarrollo de software, y se constituye en que tienen una característica de portabilidad, es decir pueden ejecutarse en diferentes dispositivos, y su usabilidad es más accesible teniendo en cuenta que su estructura en secciones es más flexible y ligera.

Finalmente, se menciona la importancia de generar herramientas que permitan apoyar y facilitar las actividades diarias que realizan los adultos mayores, especialmente, aquellos que se encuentran conformados por hogares unipersonales o aquellos que dependen de otros, o los que tienen algún tipo de problema cognitivo. De esta manera, se puede constatar como la tecnología aporta en pro de la resolución de las necesidades en la sociedad.

REFERENCIAS

- [1] Recuperado: https://www.ecotec.edu.ec/material/material_2015D1_PSI105_12_45662.pdf
- [2] Salech F. et al. (2012). Cambios fisiológicos asociados al envejecimiento. *Revista Médica Clínica Las Condes* 23(1).
- [3] Torres J. (2020). ¿Qué consecuencias tiene el exceso del consumo de fármacos en personas mayores? Recuperado: <https://theconversation.com/que-consecuencias-tiene-el-exceso-del-consumo-de-farmacos-en-personas-mayores-142875>
- [4] Staff F. (2021). Abuso de medicamentos recetados en los adultos mayores. Recuperado: <https://es.familydoctor.org/condicion/abuso-de-medicamentos-con-receta-en-adultos-mayores/>
- [5] Medicine. (2021). Pérdida de la memoria. Recuperado: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003257.htm>
- [6] Galeano R. et al. (2016). Diseño e implementación de una aplicación bajo dispositivos Android y Windows phone para la consulta de medicamentos a fin de evitar la automedicación en el municipio de Lorica. Press.
- [7] Duacode. (2019). Aplicaciones móviles: Historia y desarrollo. Recuperado: <https://www.duacode.com/es/blog-noticia/aplicaciones-moviles-desarrollo-historia>
- [8] Herazo L. (2020). ¿Qué es una aplicación móvil? Recuperado: <https://anincubator.com/que-es-una-aplicacion-movil/>
- [9] Silva A. y Bohórquez G. (2022). Diseño y validación del software para el fortalecimiento del pensamiento lógico matemático. *International Technology, Science and Society Review* 1(1), 1-12.
- [10] Silva, A. et al. (2021). Aportes educativos en soluciones tecnológicas para proveer servicios de donación de sangre entre personas naturales y bancos de sangre en la ciudad de Bogotá. En *Docencia, ciencia y humanidades: Hacia una enseñanza integral en la universidad del siglo XXI*. Madrid.
- [11] Silva, A. (2021). La gamificación como una estrategia neurodidáctica: Una revisión sistemática en su uso y apropiación. En *Innovaciones metodológicas con TIC y Educación*. Madrid.
- [12] Management Association. (1998). Kanban: Y just-in-time en Toyota. TGP Hoshin.
- [13] Cáceres M. Et al. (2019). Implementación de un sistema web para el proceso de movilidades. Universidad Tecnológica del Perú.

- [14] Marques J. (2018). Método Kanban: Saiba como controlar e agilizar os fluxos de produção da empresa. Instituto Brasileiro de Coaching.
- [15] Yepes E. y Armijos K. (2020). Aplicación de la metodología Kanban en el desarrollo del software para generación. Recuperado: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/6457/1/APLICACION%20DE%20LA%20METODOLOGIA%20KANBAN%20EN%20EL%20DESARROLLO%20DEL%20SOFTWARE%20PARA%20GENERACION.pdf>
- [16] Forero H. (2009). La Sociedad del Conocimiento. Revista Científica General José María Córdoba 5, 40-44.
- [17] CareNotes (2020). Pérdida de memoria en adultos mayores. Recuperado: <https://www.drugs.com/cg/memory-loss-in-older-adults.html>
- [18] Costa L. (2017). Desarrollo de una aplicación móvil y dispositivo para recordatorio de toma de pastillas de adultos mayores. Guayaquil.
- [19] Gonzales C. et al. (2018). Aplicaciones móviles para personas mayores: Un estudio sobre su estrategia actual. Aula Abierta Universidad Jaume I, 107-112.
- [20] Serrano L. et al. (2019). Desarrollo de una aplicación móvil como asistente. Pro Sciences 1-8.

Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo de temperatura y humedad utilizando Internet de las Cosas IOT

Bárbara Emma Sánchez Rinza¹

Liosbel Cabrera Hernández²

Mario Rossainz López³

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
México

En este trabajo se implementa un sistema para el monitoreo de la temperatura y la humedad ambiente dentro de una fábrica desarrollado en el lenguaje de programación C. El objetivo es monitorear en tiempo real la temperatura y la humedad en la que se encuentran los productos de una fábrica, ya que algunos productos son sensibles a estos dos parámetros y, aunque estén en refrigeradores, esto no garantiza que se encuentren a la temperatura o humedad ideal, ya que, si los refrigeradores sufrieran una falla eléctrica o mecánica, los productos sufrirían las consecuencias y la empresa perdería dinero y credibilidad con sus clientes. Se realiza por medio del sensor DHT11 y de la plataforma Blynk, que se utiliza para enviar la información censada a la nube y, posteriormente, a cualquier dispositivo móvil que se determine, es decir, con ayuda de internet de las cosas se puede estar monitoreando los refrigeradores en tiempo real. Se logra el monitoreo de los productos y ante problemas se emite una alarma al dispositivo móvil para informar la temperatura y la humedad; también se estarán enviando en tiempo real gráficas de los parámetros, para observar los cambios. De esta manera, el personal encargado de monitorear los parámetros puede estar informado y tomar las decisiones pertinentes.

¹ Doctora en Ciencias.

Contacto: brinza@hotmail.com

² Estudiante de Maestría en Ciencias de la Computación.

Contacto: liosbel.cabrera@gmail.com

³ Doctor en Ciencias.

Contacto: mrossainzl@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Internet de las cosas IoT describe la red de objetos físicos, *cosas*, que llevan incorporados sensores, software y otras tecnologías con el fin de conectarse e intercambiar datos con otros dispositivos y sistemas a través de Internet. Estos dispositivos van desde objetos domésticos comunes hasta herramientas industriales sofisticadas. Con más de 7 mil millones de dispositivos IoT conectados en la actualidad, los especialistas prevén que este número aumentará a 22 mil millones para el 2025. Oracle cuenta con una red de socios de dispositivos.

En los últimos años IoT se ha convertido en una de las tecnologías más importantes del siglo XXI. Ahora que podemos conectar objetos cotidianos, electrodomésticos, coches, termostatos, monitores de bebés, a Internet a través de dispositivos integrados, es posible una comunicación fluida entre personas, procesos y cosas. Si bien la idea de IoT existe desde hace mucho tiempo, una colección de avances recientes en una serie de tecnologías diferentes la ha hecho práctica:

- *Acceso a la tecnología de sensores de bajo costo y potencia.* Los sensores asequibles y fiables están haciendo posible la tecnología IoT para más fabricantes.
- *Conectividad.* Una gran cantidad de protocolos de red para Internet ha facilitado la conexión de sensores a la nube y a otras cosas para lograr una transferencia de datos eficiente
- *Plataformas de informática en la nube.* El aumento en la disponibilidad de plataformas en la nube permite a las empresas y a los consumidores acceder a la infraestructura que necesitan para escalar sin tener que administrarlo todo.
- *Aprendizaje automático y analítica.* Con los avances en aprendizaje automático y analítica, junto con el acceso a cantidades grandes y variadas de datos almacenados en la nube, las empresas pueden recopilar información de forma más rápida y fácil. Por un lado, el surgimiento de estas tecnologías aliadas sigue traspasando los límites de IoT; por otro, los datos producidos por IoT también alimentan estas tecnologías.
- *Inteligencia artificial IA conversacional.* Los avances en las redes neuronales han llevado el procesamiento del lenguaje natural (PLN) a los dispositivos IoT (como los asistentes personales digitales Alexa, Cortana y Siri) y los han hecho atractivos, asequibles y viables para uso doméstico.

Mediante la informática de bajo costo, la nube, grandes datos, analítica y tecnologías móviles, las cosas físicas pueden compartir y recopilar datos con una mínima intervención humana. En este mundo hiperconectado, los sistemas digitales pueden grabar, supervisar y ajustar cada interacción entre las cosas conectadas. El mundo físico y el digital van de la mano y cooperan entre sí. El IoT industrial IIoT hace referencia a la aplicación de la tecnología IoT en entornos industriales, especialmente con respecto a la instrumentación y control de sensores y dispositivos que utilizan tecnologías en la nube. Estas aplicaciones inteligentes de IoT son aplicaciones de software como servicio SaaS predefinida, que puede analizar y presentar datos de sensores de IoT capturados a los usuarios empresariales a través de cuadros de mando.

Esta aplicación de IoT analizar cantidades masivas de datos de sensores conectados en la nube. Al usar cuadros de mando y alertas de IoT en tiempo real, consigues visibilidad acerca de los indicadores clave de rendimiento, estadísticas del tiempo medio entre fallos y otra información. Este trabajo detecta anomalías en los equipos y enviar alertas a los usuarios e incluso activar soluciones automáticas o contramedidas proactivas.

Con las aplicaciones de IoT basadas en la nube, los usuarios empresariales pueden mejorar rápidamente los procesos existentes para las cadenas de suministro, servicio al cliente, recursos humanos y servicios financieros. No es necesario recrear procesos de negocio completos. Este sistema de control de temperatura y humedad se realizó por medio de la placa de desarrollo NodeMCU ESP8266 [1, 2] y un sensor DHT11. En el presente trabajo se utiliza la librería ESP8266Wifi.h para configurar los datos necesarios que permitan conectar la placa de desarrollo a la red inalámbrica. Además, se incluye la librería DHT.h, la cual permite la obtención de los datos captados por el sensor. Estos datos serán impresos en pantalla y además se podrá

realizar un seguimiento de estos desde celulares y computadoras utilizando la plataforma Blynk. Se quiere hacer hincapié que la realización de este trabajo, es importante para las empresas, hoy en día, y además se está utilizando tecnología (IoT con acceso remoto, que resulta ser ya una necesidad para poder resolver problemas de empresas, que se requieren para reducir sus pérdidas económicas. Porque ninguna empresa está exenta de que tenga fallas eléctricas o que uno o varios refrigeradores tenga una falla mecánica o que el personal no haya cerrado correctamente las puertas de los refrigeradores [3,4].

2. MÉTODO

2.1 Componentes utilizados

Se utiliza la placa NodeMCU (Figura 1) basada en el módulo ESP8266 que es una tarjeta similar al Arduino la diferencia es que el NodeMCU está orientada a IoT, contiene una serie de pines de entrada y salida, con estos se puede acceder a internet en forma inalámbrica y conectar los sensores necesarios [5].



Figura 1. Tarjeta de desarrollo Node MCU

Especificaciones técnicas:

- Voltaje de Alimentación (USB): 5V DC
- Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC
- CPU: Tensilica Xtensa LX3 (32 bit)
- Frecuencia de Reloj: 80MHz/160MHz
- Instruction RAM: 32KB
- Data RAM: 96KB
- Memoria Flash Externa: 4MB
- Pines Digitales GPIO: 17 (pueden configurarse como PWM a 3.3V)
- Pin Analógico ADC: 1 (0-1V)

También se utilizar DHT11, un sensor de temperatura y humedad que cuenta con una salida de señal digital calibrada. Usando técnica de adquisición de señales digitales y la tecnología de detección de temperatura y humedad, se garantiza una alta confiabilidad y una excelente estabilidad a largo plazo. Este sensor incluye un componente de medición de humedad de tipo resistivo y un componente de medición de temperatura NTC, y se conecta a un Microcontrolador de 8 bits de alto rendimiento que ofrece excelente calidad, respuesta rápida, capacidad anti interferencias y rentabilidad [6-8].

DHT11 está estrictamente calibrado en laboratorio para ser extremadamente preciso. Los coeficientes de calibración se almacenan como programas en la memoria OTP, que son utilizados por el proceso de detección de señales internas del sensor. La interfaz serial de un solo cable hace que la integración del sistema sea rápida y sencilla. Su pequeño tamaño, bajo consumo de energía de 3 a 5 v y hasta 20 transmisión de señal del medidor, lo que lo convierte en la mejor opción para esta aplicación (Figura 2).

Especificaciones técnicas:

- Voltaje de Operación: 3V - 5V DC
- Rango de medición de temperatura: 0 a 50 °C

- Precisión de medición de temperatura: ± 2.0 °C
- Resolución Temperatura: 0.1°C
- Rango de medición de humedad: 20% a 90% RH.
- Precisión de medición de humedad: 5% RH.
- Resolución Humedad: 1% RH
- Tiempo de sensado: 1 seg.
- Interface digital: Single-bus (bidireccional)
- Modelo: DHT11
- Dimensiones: 16*12*5 mm
- Peso: 1 gr.
- Carcasa de plástico celeste

Pines:

- 1- Alimentación: +5V (VCC)
- 2- Datos (DATA)
- 3- No Usado (NC)
- 4- Tierra (GND)



Figura 2. Sensor de temperatura y humedad DHT11

Por otra parte, se utilizará Blynk que ofrece una plataforma de internet de las cosas (IoT) de marca blanca que ofrece software, firmware, soluciones web y aplicaciones móviles a miles de pequeñas, medianas y grandes empresas de todo el mundo. Blynk es la plataforma de IoT más popular para conectar dispositivos a la nube, diseñar aplicaciones para controlarlos y supervisarlos de forma remota, y administrar miles de productos implementados [9,10]. El software Blynk ayuda a individuos y organizaciones a avanzar fluidamente desde un prototipo de un producto conectado hasta su lanzamiento comercial.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Utilizando Arduino IDE y la placa de desarrollo NodeMCU ESP8266 conectada con el sensor de temperatura y humedad DHT11 (Figura 3). Se implementó un sistema que mantenga un monitoreo constante de la temperatura y humedad del ambiente. Este sistema podría tener múltiples aplicaciones, fundamentalmente en el sector empresarial. El sensor captará los datos del ambiente y a través de Arduino IDE se imprimirán en pantalla. También se programarán mensajes de alerta para notificar al usuario cuando la temperatura y la humedad alcancen valores que superen los límites definidos en el código de la aplicación, esto varía según el producto, ya que los rangos de temperatura y de humedad son diferentes para determinados productos, por ejemplo, no es lo mismo una empresa de alimentos que una empresa de fármacos



Figura 3. Arreglo del proyecto

Además de mostrar los datos con Arduino IDE, también se colocarán los datos en la nube utilizando la plataforma Blynk y la librería BlynkSimpleEsp8266.h, que nos permite enviar los valores de temperatura y humedad a esta plataforma, si tenemos la NodeMCU conectada a la red Wifi. Con el envío de los datos a la plataforma, podemos tener un seguimiento constante de los parámetros, a través del sitio de Blynk en internet o de su aplicación para dispositivos móviles. Se utilizarán gráficas para un mejor seguimiento de los datos. Blynk también nos permite enviar notificaciones *pushy* vía email, cuando los valores alcancen los límites que se han definido.

3.1 Diagrama del programa

El programa inicia su funcionamiento cargando las librerías necesarias para su funcionamiento, que son aquellas relacionadas a la conexión de la tarjeta a la red inalámbrica, el reconocimiento del sensor de Temperatura y Humedad, y la conexión con la plataforma Blynk. Posteriormente se declaran las variables que serán utilizadas en el código, como las utilizadas para almacenar el usuario y la contraseña de la wifi a la que se conectará la tarjeta y también el token necesario para acceder a la plataforma Blynk (Figura 4). A continuación, se establece la conexión a la red para que la tarjeta tenga acceso a internet. Utilizando esta conexión y el token necesario se inicia la conexión con Blynk. Por último, se recopilan de forma cíclica en intervalos pequeños de tiempo los datos de Humedad y Temperatura captados por el sensor y estos se envían de forma continua a Blynk para que puedan ser vistos desde el teléfono celular o la PC.

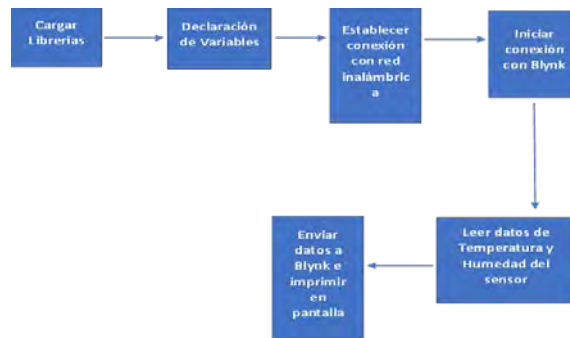


Figura 4. Diagrama general del proyecto

3.2 Código del programa en Arduino IDE

La Figura 5 muestra el código implementado para el funcionamiento del sistema en Arduino IDE.

```

temperature-humidity-blynk-iot$
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPLKLU7VBE"
#define BLYNK_DEVICE_NAME "Temperatura"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "g3A8M2LAI-zDhaolSM6n7b2k0e96jShH"

#define BLYNK_PRINT Serial
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp8266.h>

#include <DHT.h>

char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN;

char ssid[] = "Vivio";
char pass[] = "FAA2750AWQamCa8C";

BlynkTimer timer;

#define DHTPIN 4 //Connect Out pin to D2 in NODE MCU
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void sendSensor()
{
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();

  float v = dht.readTemperature();

  if (isnan(h) || isnan(t) ) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
    return;
  }
  Blynk.virtualWrite(V0, t);
  Blynk.virtualWrite(V1, h);
  Serial.print("Temperature : ");
  Serial.print(t);
  Serial.print(" Humidity : ");
  Serial.println(h);
  if (h>50){
    Serial.println("La Humedad excede los parametros normales");
    Blynk.logEvent("notificacion", "Humedad alta");
  }
  if (t>32){
    Serial.println("La Temperatura excede los parametros normales");
    Blynk.logEvent("notificacion", "Temperatura alta");
  }
  timer.setInterval(1000L, sendSensor);
}

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Blynk.begin(auth, ssid, pass);
  dht.begin();
  timer.setInterval(1000L, sendSensor);
}

void loop()
{
  Blynk.run();
  timer.run();
}
  
```

Figura 5. Código del funcionamiento del arduino IDE

3.3 Implementación

La Figura 6 muestra la impresión en pantalla de los datos obtenidos por el sensor en el programa.

```
Temperature : 29.80 Humidity : 62.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 29.80 Humidity : 62.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 29.80 Humidity : 60.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 29.80 Humidity : 60.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 30.20 Humidity : 56.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 30.20 Humidity : 56.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 30.20 Humidity : 54.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 30.20 Humidity : 54.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 30.20 Humidity : 51.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 30.20 Humidity : 51.00
La Humedad excede los parametros normales
Temperature : 30.80 Humidity : 49.00
Temperature : 30.80 Humidity : 49.00
Temperature : 30.80 Humidity : 47.00
Temperature : 30.80 Humidity : 47.00
Temperature : 30.80 Humidity : 46.00
Temperature : 30.80 Humidity : 46.00
Temperature : 30.80 Humidity : 45.00
Temperature : 30.80 Humidity : 45.00
Temperature : 30.80 Humidity : 44.00
Temperature : 30.80 Humidity : 44.00
Temperature : 30.80 Humidity : 42.00
Temperature : 30.80 Humidity : 42.00
Temperature : 30.80 Humidity : 42.00
Temperature : 30.80 Humidity : 42.00
Temperature : 30.80 Humidity : 41.00
Temperature : 30.80 Humidity : 41.00
```

Figura 6. Impresión de los datos obtenidos por el sensor

En la Figura 7 se puede apreciar una vista de la plataforma Blynk, en su sitio en internet. Donde se puede realizar un seguimiento constante de los parámetros que están siendo enviados por el sensor.

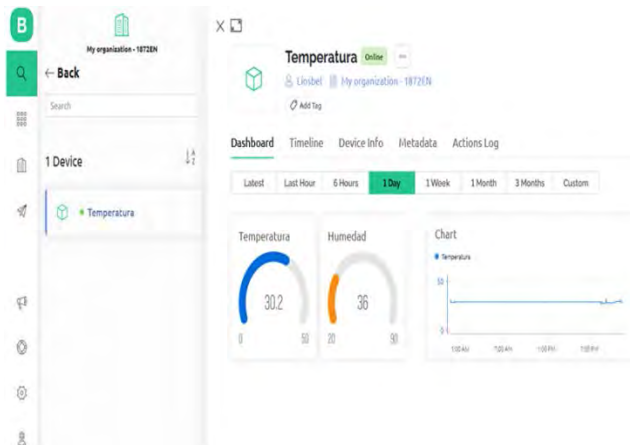


Figura 7. Plataforma Blynk

La Figura 8 muestra una captura de la pantalla de un dispositivo móvil, donde se está ejecutando la aplicación Blynk para dispositivos Android. En la misma también podemos mantener un seguimiento en tiempo real

de los datos que esté reportando el sensor. Para facilitar la comprensión de estos, se incluyeron graficas que van mostrando el comportamiento de los parámetros en diferentes periodos de tiempo.



Figura 8. Datos que son enviados por el sensor a un dispositivo móvil

Las Figuras 9 y 10 muestran las notificaciones que envía Blynk vía email y push respectivamente, reportando que la temperatura o la humedad han sobrepasado los límites definidos.

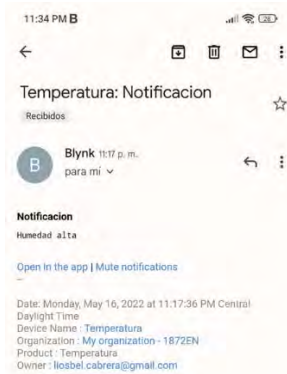


Figura 9. Notificación que envía Blynk a email cuando la humedad o la temperatura cambia a un rango que pone en peligro el producto



Figura 10. Notificación que envía Blynk a dispositivo móvil cuando la humedad esta fuera de rango y afecta al producto

4. CONCLUSIONES

Este trabajo es muy importante para las empresas que manejan productos que tienen que ser refrigerados y que además la humedad también debe de ser controlada, en el siguiente proyecto se pudo observar que mediante la tarjeta NodeMCU ESP8266, el sensor DHT11 y la plataforma Blynk y las librerías necesarias para captar los datos del sensor y enviarlos a Blynk. Se creó un programa para monitorear los parámetros de temperatura y humedad, que permite enviar notificaciones si rebasan los límites definidos. Todo esto es fácil en la actualidad gracias a internet de las cosas podemos estar monitoreando los refrigeradores ya sea por una cuenta email o por medio de un dispositivo móvil.

Este proyecto permitirá a las empresas que manejen productos, que requieran que se controle tanto la temperatura como la humedad tener menos pérdidas económicas para su empresa ya que cuando los refrigeradores tengan una falla ya sea eléctrica o mecánica, o porque no decirlo hasta humana, se pueda censar en tiempo real, y el producto o los productos puedan ser llevados a otro refrigerador para que no se descompongan y la empresa no tenga pérdidas económicas o pierda credibilidad con sus clientes. A medida que IoT se generaliza en el mercado, las empresas están capitalizando el tremendo valor empresarial que puede ofrecer. Estas son sus ventajas:

- Obtener información basada en los datos de IoT para ayudar a administrar mejor el negocio
- Aumentar la productividad y eficiencia de las operaciones empresariales
- Crear nuevos modelos de negocio y flujos de ingresos
- Conectar fácilmente y sin problemas el mundo de los negocios físicos con el mundo digital para generar un valor rápido

La capacidad de supervisar de forma remota las máquinas también está dando paso a nuevos modelos de negocio de productos como servicios, donde los clientes compran un producto, con la confianza que tiene todas las normas de calidad especificadas por el fabricante.

La industria es una de las más adecuadas para IoT porque se benefician del uso de dispositivos sensores en sus procesos de negocio.

Los fabricantes pueden disfrutar de una ventaja competitiva mediante el uso de la supervisión de la línea de producción a fin de realizar el mantenimiento proactivo de los equipos cuando los sensores detectan una falla inminente. Los sensores pueden medir realmente cuándo se ve comprometida la producción. Con la ayuda de alertas de sensores, los fabricantes pueden verificar rápidamente la precisión del equipo o eliminarlo de la producción hasta que se repare. Esto permite a las empresas reducir los costos operativos, obtener mayor tiempo de actividad y mejorar la gestión del rendimiento de los activos.

REFERENCIAS

- [1] Kopetz H. (2011) Internet of Things. En Real-Time Systems. Springer.
- [2] Sucipto S. y Karaman J. (2020). Integration of Legalization Information System Web-Based using Shipping API and Telegram API. Jurnal Informatika 8(2), 131-139.
- [3] David N. et al. (2015). Design of a home automation system using arduino. International Journal of Scientific Engineering Research 6(6), 795-801.
- [4] Purnamasari A. y Setiawan A. (2019). Pengembangan Passive Infrared Sensor (PIR) HC-SR501 dengan Microcontrollers ESP32-CAM Berbasiskan Internet of Things (IoT) dan Smart Home sebagai Deteksi Gerak untuk Keamanan Perumahan. SISFOTEK 3(1), 148-154.
- [5] Greene A. et al. (2020). Coral-Cam: A flexible, low-cost ecological monitoring platform. HardwareX.
- [6] Maqueda E. et al. (2019). Servidor Chat en tarjeta MODEMCU. Revista ELECTRO 41, 244-247.
- [7] Rojas F. et al. (2019). Implementación de un foro chat para empresa. Revista ELECTRO 41, 230-234.
- [8] Sánchez B. (2020). Desarrollo de un sistema distribuido para el monitoreo de consumo eléctrico en las empresas. Revista ELECTRO 42, 83-89.
- [9] Sánchez B. (2020). Monitoreo de incendio por medio de interne de las cosas. Revista ELECTRO 42, 107-112.
- [10] Sánchez B. et al. (2021). Seguridad residencial a través de Bot de telegram y sensores de movimiento PIR. Revista ELECTRO 43, 137-142.

Machine Learning predictivo a partir de la analítica y de modelos de inteligencia artificial. Un caso de estudio

Raúl Bareño Gutiérrez¹
Fundación Universitaria Compensar
Colombia

De la mano de una política migratoria incluyente el crecimiento de la población afiliada en los diferentes regímenes de salud en Colombia crece, haciendo que el sistema de salud y las diferentes plataformas donde se reportan estén al límite. Dado que los recursos son insuficientes y poco alcanzan para satisfacer la alta demanda, el uso de tecnología debe permitir validar el comportamiento de la información depurada, validada y tangible para la toma de decisiones. Por ello se hace uso de la analítica y de los modelos de inteligencia artificial con enfoque metodológico, que permita usar datos depurados y abiertos de entidades como Sivigila, DANE, Datos abiertos de Colombia, etc. Para contrastar información de diversas fuentes mediante un sistema experto que valide la identificación de *insights*, para lograr, por ejemplo, un diagnóstico de las posibles causas de muertes perinatales y neonatales, dado el crecimiento exponencial de mortalidad en distintas poblaciones de la ciudad de Bogotá. A partir de los datos recopilados y depurados de conceptos, registros de mortalidad infantil y desnutrición nacional, en este estudio se aplicó metodologías de calidad de datos como Cross Industry Standard Process for Data Mining Crisp DM y Sample, Explore, Modify, Model, Assess SEMMA, para desarrollar un modelo *machine learning* de carácter predictivo. Se logró validar la correlación de las muertes proporcionales y en relación directa con la desnutrición asociados a estratos 1-2-3 como los más predominantes

¹ Ingeniero de Sistemas, Especialista en Seguridad informática, Especialista en Telecomunicaciones y Magíster en Telemática.
Contacto: rbarenog@ucompensar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La inteligencia Artificial, Grandes datos, el análisis de datos, la ciencia de datos, entre otros, se han convertido en tendencia a nivel mundial, por el crecimiento del volumen en los datos generados por los sistemas de información en el sector salud [1], por tal motivo, se ha evidenciado la necesidad de optimizar y generar métodos, modelos de almacenamiento y tratamiento de los datos que permitan darle sentido a todos los datos que se custodian [2].

Durante la investigación, se tomó como referencia la información disponible del sector salud de sistemas de información como Sivigila [3], DANE, datos abiertos del gobierno nacional, etc., y con el apoyo de técnicas matemáticas, estadísticas, y herramientas de apoyo como power BI se llevó a cabo la aplicación de la analítica de datos y la ciencia de datos en el sector salud [4]; permitiendo realizar un análisis descriptivo, predictivos de la muerte neonatal [5] y perinatal en menores de cinco años en la ciudad de Bogotá.

La alcaldía de Bogotá planteó una política pública de datos abiertos que permiten aplicar la ciencia, innovación, hacia contrastar y validar el nivel de confianza de cada una de las entidades que reportan la información, porque muchas veces la gran cantidad y diversidad de datos trascienden en conocimiento sin las herramientas adecuadas para validar la diversidad de las fuentes de datos de los eventos epidemiológicos en cuanto a la muerte neonatal –perinatal, su integridad, e interoperabilidad del gobierno, gestión de los datos y de los diferentes sistemas de información del sector que manejan las historias clínicas digitales en la ciudad [6].

Según la Organización Mundial de la Salud OMS y la Clasificación Internacional de Enfermedades en su décima versión [7] la mortalidad perinatal se refiere a las mortalidades que ocurren a partir de las 22 semanas de gestación y termina a los siete días después del nacimiento. La mortalidad neonatal hace referencia a los recién nacidos que fallecen antes de alcanzar los 28 días de vida. Estas muertes son consideradas indicadores universales tanto de condiciones de vida, desarrollo humano, calidad y acceso a los servicios de salud.

La mortalidad perinatal y neonatal tardía son indicadores ligados a la reproducción y reflejan la atención preconcepcional, prenatal, durante el parto y posparto [8]. Es un marcador tanto de la calidad del servicio de salud materno infantil como de la condición nutricional de la madre y del entorno en que vive. Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible se menciona este tema y se espera que para 2030, debe reducir la mortalidad neonatal al menos hasta 12 por cada 1.000 nacidos vivos [9].

En la actualidad, diariamente se generan grandes volúmenes de datos y más en aquellos ámbitos donde se hace la gestión de salud pública para prevenir muertes y disminuir costos relacionados a estas, por consiguiente, se hace necesario el uso de la ciencia de datos para la administración y determinación de un modelo predictivo o identificación de *insights* clave para mitigar el problema en pro de generar proactividad en la gestión oportuna y evitar al máximo las muertes de neonatales tratados en la ciudad de Bogotá

En la ley 100 artículo 173 se establece que el Ministerio de Protección Social es el responsable de la recolección, transferencia y difusión de la información en los subsistemas a los que concurren obligatoriamente todos los integrantes de la seguridad social; y dado el amplio rango de datos, sistemas y reglas distintas en cada sector de la salud donde se recolectan los datos, cada vez más, es complejo focalizar la información relevante para unificar, hacer seguimiento mediante auditorías a nivel nacional.

Si bien han mejorado mucho con la infraestructura de Sivigila, y otras entidades; dan muestra de oportunidades de mejora en el sentido de la ciencia de datos aplicada a la salud puesto que con el uso correcto de técnicas de ETL e identificando los datos importantes para una toma de decisiones gerencial a nivel gubernamental en pro de generar confianza en la data vista y en los procesos realizados por las personas de la recolección de datos en las diferentes fuentes de información.

Finalmente, es necesario disponer de un nivel de detalle óptimo de los datos y de su calidad aportados a las diferentes entidades que nos pueda brindar variables básicas para dar respuesta a incógnitas específicas

hacia planes de acción que ayuden a optimizar la planeación de proyectos que mitiguen este tipo de muertes bien sean concebidos o aún en proceso de gestación. Por ello se plantea la pregunta: ¿Cómo puede la tecnología y la ciencia de los datos apoyar la toma de decisiones en Bogotá frente a la mortalidad neonatal y perinatal de los niños menores de cinco años?

2. MÉTODO

El enfoque investigativo utilizado es de tipo mixto, la unión de instrumentos de enfoque cuantitativo y cualitativo, utilizando la recopilación de datos de diversas fuentes y aplicando técnicas de Extracción, transformación y limpieza de los datos; a partir de data abierta recopilada de diversas fuentes como Sivigila, DANE, salud data, entre otras fuentes; y partiendo de una amplia información recopilada y pertinente con el objeto de investigación específicamente de la ciudad de Bogotá Distrito capital, en cuanto a muerte de neonatales, y perinatales de los últimos años.

Lo anterior, con la finalidad de encontrar factores o inferencias, causas o sintomatologías. A partir de esta información, se generaron modelos de datos viables para la identificación y depuración de la data, validando que la investigación es data sensible y de difícil acceso, poco ordenada y difícil de contrastar en cuanto a su caracterización hacia la gestión de los datos; por ello, la complejidad hacia determinar un modelo predictivo o identificación de *insights* clave para la detección del problema a partir de la data set a utilizar con un entorno de desarrollo como el lenguaje Python y sus librerías hacia lograr la integración y desarrollo de un modelo de ciencia de datos [10].

La metodología utilizada fue Crisp-DM y Semma [11-13] para la aplicación del análisis de datos basados en 3 principales conceptos: muerte de neonatales, desnutrición en menores de 5 años y mortalidad por desnutrición en Bogotá, dado que estas técnicas son muy utilizadas en analítica Data Science o Data Analytics en el sector salud [14]. Dentro de las fases de esta técnica; se resalta el aspecto de modelado y de redes neuronales para dar forma a los datos con alta calidad de precisión.

La muestra recopilada acerca de la mortalidad neonatal y perinatal en la ciudad de Bogotá, revisando estadísticas y entendiendo su comportamiento entre 2008 y 2019. Sobre las fuentes confiables de datos abiertos con información de valor para nuestro estudio y análisis con enfoque cuantitativo agrupados por localidad, para entender el comportamiento y la curva de crecimiento que existieron en cuanto a muertes a lo largo del tiempo. Sobre la información del DANE a partir de data nacional en Colombia, se pudo comprender y acotar con mayor precisión al alcance

En la fase de preparación de los datos se dificultó la comprensión inicial de su estructura, por ello, técnicas de ETL [15] facilitaron el análisis, y depuración revisando variables significativas, de los data sets no pertinentes y lograr generar una transformación, además se homologó algunas variables a contrastar, se crean campos calculados y filtros necesarios, dentro de los datos y se acota a Bogotá. Con la data limpia y depurada se cargan a la herramienta Power BI [16]; además, generar modelos con los datos con apoyo de otra herramienta como power query y generar Dashboard [17].

También, se aplicó otro modelo de Forecasting [18, 19] que entrega certeza y confianza para identificar la cantidad probable de muertes neonatales y perinatales en la ciudad de Bogotá discriminando estas por cualquiera de nuestras variables demográficas. El modelo predictivo implementado fue satisfactorio, y estimado a la actualidad; arrojando mapas de calor por localidades, algunos gráficos de líneas y barras, pirámides poblacionales, gráficos de burbujas entre otros.

3. RESULTADOS

Para iniciar un correcto análisis de datos, se tomó sin filtros de ningún tipo el total de registros nacionales y poder estimar el tamaño real de nuestro data set para acotar a Bogotá. Encontrando valores y estructuras pertinentes de 89769 una cifra bastante resumida para la elaboración y desarrollo del algoritmo. La herramienta para el desarrollo y análisis de las fuentes de datos encontradas fue sobre Python [20, 21] y para su análisis de power BI. Teniendo en cuenta que la funcionalidad a partir de los datos poblacionales

del caso a estudiar y así devolver las probabilidades de la causa del evento: Muerte Perinatal – Neonatal, en un informe descriptivo. Para entrenar el modelo usando cascada y la red neuronal con Python [22, 23] se toman archivos .csv para crear la data inicial (Figura 1), con la cual arroja una constante porcentual y permita validar las posibilidades del evento (Muerte Perinatal - Neonatal) por causas de desplazamiento – pobreza – estrato y desnutrición entre otras variables consideradas.

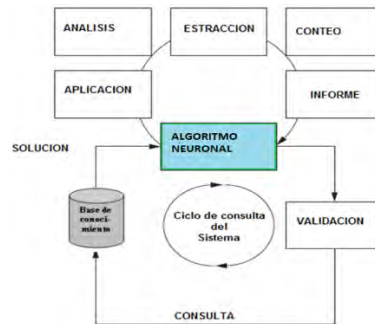


Figura 1. Modelo de los datos

Con los datos limpios y depurados se generan tres pestañas en el Dashboard en power BI (Figura 2). La primera hace un análisis general descriptivo de las muertes neonatales y perinatales en la ciudad de Bogotá durante los últimos 11 años; la segunda, refleja el dato histórico del objeto de estudio, el forecasting sintetiza el comportamiento del fenómeno en cuanto a las muertes estimadas a futuro y la tercera, con mayor detalle de los datos en cuanto a análisis demográficos aportado, para validar el comportamiento de los tipos de muertes asociadas a las variables por causas, estratos, periodos de gestación, edad de la madre, Condición de desplazamiento, Situación de pobreza, estrato socioeconómico, grupo poblacional, grupo migrante y otras variables que generan valor al análisis.



Figura 2. Índice del Dashboard

Se perfila el análisis histórico de la mortalidad neonatal y perinatal en Bogotá (Figura 3) en cuanto al comportamiento general de las muertes, año tras año; Indica que este tipo de muertes ha disminuido de tener 1.302 en 2010 a 615 en 2020, esta variación se debe a la cantidad de nacidos año tras año ha disminuido considerablemente, y aunque pareciera alentador la disminución de muertes lo cierto es que la tasa de mortalidad no ha disminuido, y en los últimos dos años ha aumentado.



Figura 3. Casos de mortalidad y tasa por año

Además, la localidad con mayor tasa de mortalidad es Kennedy con un 14,34%, le sigue Suba con 13.68%, Ciudad Bolívar y Bosa con participaciones de 11,50% y 10% respectivamente, estas 4 localidades arrojan

cerca del 50% en la ciudad de Bogotá; Manteniendo su tendencia durante 2020, dado su población y tamaño, y ubicadas al sur de la ciudad (Figura 4.) que también permite contrastar que las muertes neonatales tempranas tienen una participación mayor respecto a las muertes post neonatales y las muertes neonatales tardías.

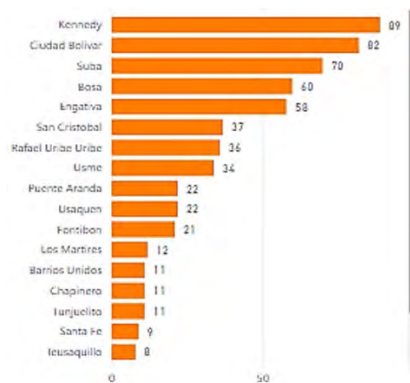


Figura 4. Casos de mortalidad por localidad en 2020

El análisis del Forecasting se contrasta un comportamiento similar donde las muertes disminuyen por lo tanto el modelo induce que para el año 2021 disminuye un 7% de muertes frente al 2020. Se espera que en 2024 disminuya 40% respecto de 2020 llegando a una cifra de 379 muertes en este año. Se destaca, del modelo propuesto; que las muertes en la ciudad de Bogotá seguirán disminuyendo en algunas localidades en otras será lineal, como en las localidades de: Martines, Chapinero, Puente Aranda, Teusaquillo y Usaquén (Figura 5).

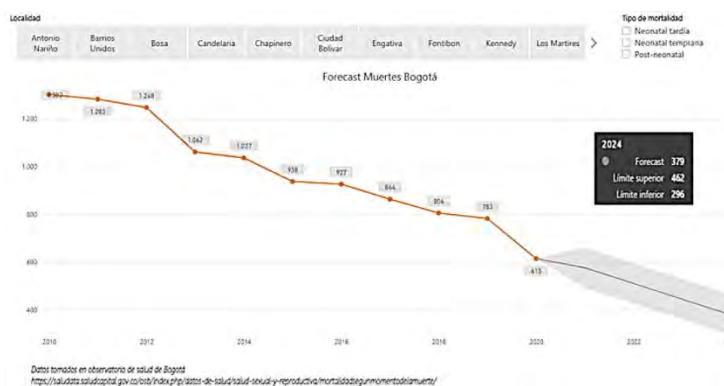


Figura 5. Forecasting mortalidad en Bogotá neonatales y perinatales

Finalmente, se hace un análisis específico de 2019 dado su importancia hacia el futuro en cuanto a la toma de decisiones para la ciudad de Bogotá. Encontrando las 3 principales causas de muertes, el 68% se debe a feto o recién nacido afectado por otras complicaciones maternas, y con 5,13% se encuentra feto o recién nacido afectado por embarazo ectópico y con un 4,22% se tiene la terminación del embarazo, feto y recién nacido. dependiendo de las semanas de gestación las causas tienden a variar. Y más del 72% de ellas suceden antes de las 22 semanas de embarazo (Figura 6).

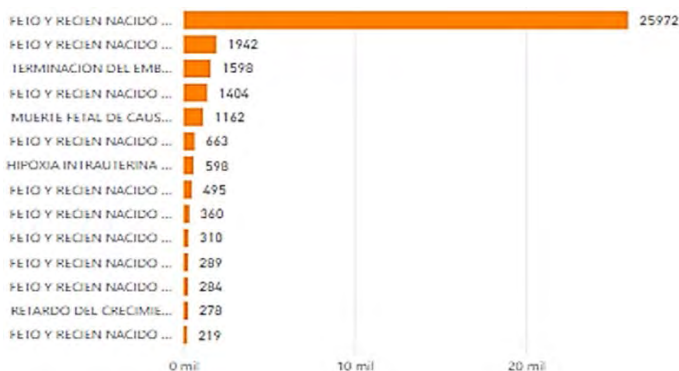


Figura 6. Cantidad de muertes por causa principal

También es importante destacar que, si se contrasta mes a mes de la vigencia 2019 de muertes por este fenómeno, durante el segundo trimestre se encuentra concentradas la mayor cantidad de muertes, destacándose mayo con un pico importante (Figura 7) que define la tendencia de este tipo de muertes durante los siguientes meses, y con tendencia a aumentar al iniciar cada año.



Figura 7. Comportamiento de muertes durante 2019

El análisis de las causas de muerte dados los datos y la calidad de estos aportados son: afecciones maternas, malformaciones congénitas, traumatismo de la madre y embarazo ectópico, esta última es una de las 3 principales y con tendencia a crecer. El modelo también permitió validar qué, el 45% de los casos de mortalidad se tiene una afiliación a régimen subsidiado (Tabla 1), siendo la mayoría de los casos resultantes en estratos bajos o en familias con bajos recursos. Es una alerta que el 14% de los casos se dan en familias sin ningún tipo de afiliación al régimen de salud.

Tabla 1. Cantidad de muertes por tipo de afiliación a la seguridad social

Régimen	Cantidad	% de participación
subsidiado	17.242	45,52
contributivo	14.238	37,59
No asegurado	5.326	14,06
excepción	761	2,01
Sin información	301	0,79
especial	7	0,02
Total	37875	100

El 25% de muertes sucede en mujeres con edades entre los 20 y 24 años y en rango entre 25 y 29 años es de 20.36% alrededor del 46% de las muertes de neonatos y perinatales esta entre los 20 y 29 años. (Figura 8); y el 54% restante sucede las madres presentan un nivel educativo no mayor al bachiller académico, dado los estratos bajos y los índices de calidad de vida y de alimentación en familias de bajos recursos.



Figura 8. Muertes perinatales y neonatales según la edad de la madre

4. DISCUSIÓN

Son amplias las posibilidades y los estudios de la ciencia de los datos al servicio de la salud [24-25], bajo datos abiertos en Colombia y en el mundo y para el caso de muerte perinatal y neonatal es muy poco lo que se encuentra, por ello, para la ciudad se hace complejo su contrastación. considerando el número de variables tan específicas con la data abierta encontrada y acotada en el marco del objeto de investigación.

En razón a ello, se pudo identificar comportamientos de cantidad y tasas de mortalidad acompañadas de una predicción por sectores en la ciudad, por edades de las madres, estrato, causas entre otras. El uso de la analítica y de la inteligencia artificial mediante modelos predictivos realizados en otros países resaltan la importancia de las variables y el enfoque que se quiera dar, estudios realizados en Barcelona [26] frente a la predicción de mortalidad de recién nacidos prematuros nos habla acerca de la evolución de los tipos de modelos para este objetivo, por niño para un mejor uso de recursos. En nuestro país los datos abiertos son escasos a comparación de otros países como España en donde tienen herramientas como la red SEN 100 la cual les ayuda a obtener datos de valor para este tipo de análisis.

El estudio menciona la importancia de la accesibilidad a datos abiertos que sea de mayor utilidad para la toma de decisiones y programas y campañas específicas en el campo de estudio que se puedan contrastar mediante diferentes modelos predictivos dado el contexto de aplicación, sus variables diversas y diferentes dentro de momentos de la validación del modelo y de los datos.

Por ello, se deben continuar haciendo análisis más específicos con alto nivel de detalle que permitan tener mayor grado de certeza de este tipo de muertes perinatales y neonatales, en sus causas dado las historias clínicas digitales donde se pueda validar antecedentes, entre otros históricos importantes y fundamentales para el modelo o la implementación de otros modelos que entreguen mayor grado de certeza y contrastación.

En Buenos Aires [27] efectuaron estudios preliminares en este campo, que presentan aspectos interesantes como se refleja en el Tabla 2. Donde se enfoca hacia identificar las muertes reducibles, se destaca la variable de madre adolescente es de gran valor en participación en ambos estudios. Sin embargo, en nuestro estudio el 80% de las muertes perinatales y neonatales se dan antes de las 34 semanas mientras que en el estudio de buenos aires solo un 45% de los casos. si bien las malformaciones aparecen en nuestro estudio esta causal no es tan relevante como lo es en el estudio de Buenos Aires.

Tabla 2. Comparación de parámetros estudio Buenos Aires y estudio Bogotá

Parámetros	Buenos Aires	Bogotá
Madre adolescente	62%	40%
Afección principal	Infecciones, aspectos respiratorios	Complicaciones maternas de índole congénito
Tiempo menor a 34 semanas	45%	80%
Malformaciones	38%	4%

En términos generales, dado lo específico de nuestro estudio se hizo difícil su comparativo con otros; la importancia de la ciencia de los datos y de la analítica, sobre diversas variables son fundamentales dado los contextos sobre los cuales se desarrollan y los niveles de certeza y de confianza de los datos en estos países, siendo, un aspecto muy importante a resaltar; y que se debe replicar al modelo de la calidad de los datos y la entrega en sistemas de información abiertos en nuestro país; finalmente, tener accesibilidad más detallada a datos de mortalidades, y morbilidades sin invadir los niveles de privacidad podrían aportar a investigaciones que generen valor agregado hacia futuros análisis en este campo.

5. CONCLUSIONES

Son diversos los análisis y contrastes con la gestión y calidad de los datos recopilados en la historia clínica digital de los pacientes específicamente en la ciudad de Bogotá en cuanto a la Muerte Neonatal – Perinatal, es evidente que la recopilación de los datos y la diversidad de las fuentes hace difícil su comparación y contrastación, la investigación evidencia, que se requiere mayor compromiso y calidad en los instrumentos y fuentes que permitan tener mayores certezas con los datos reportados y encontrados en fuentes abiertas.

La ciencia de los datos y la analítica, de la mano de la tecnología, encuentra que este tipo de muertes está directamente relacionado, con variables como la pobreza extrema, los cuidados prenatales, y complicaciones maternas, el cual según el análisis es el factor más influyente por ello, la importancia de políticas públicas en sectores vulnerables que permitan diseñar estrategias y campañas, hacia su mitigación, específicamente, en el rango de mujeres de 20-30 años.

El algoritmo implementado, evidencia que en Bogotá la muerte neonatal y perinatal, disminuye, pero no por campañas, se debe a que los nacimientos disminuyen, pero la tasa de mortalidad aumenta, por lo tanto; el resultado no es alentador en localidades del sur de la ciudad donde se concentra la mayor zona poblacional y de familias de estratos bajos, migrantes entre otros. Algunos con algún tipo de régimen subsidiado y otras sin afiliaciones a ningún régimen.

El estudio también destaca la mortalidad a causa de embarazo ectópico, es una de las causas principales y frecuentes. Finalmente, el crecimiento de muerte de neonatales que evidencia el estudio debe llevar a generar políticas públicas serias, responsables y continuas; no solo a nivel regional, distrital o departamental, cuando debería ser un plan nacional.

Se recomienda en futuras investigaciones validar y contrastar más variables que permitan entregar mayores certezas, con otras fuentes no solo de datos abiertos de la ciudad; también de datos privados, que permitan validar la gestión y calidad de la información de diferentes fuentes y tan disímiles entre las diferentes entidades, hacia lograr la integración en un solo sistema para evitar ambigüedades en el modelo planteado.

REFERENCIAS

- [1] Ávila T. et al. (2020). La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina. *Atención Primaria* 52(10), 778-784.
- [2] Hernández E. et al. (2017). Grandes datos: Una exploración de investigaciones, tecnologías y casos de aplicación. *Tecnológicas* 20(39), 17-24.
- [3] Acero M. y Plata S. (2017). Caracterización de las anomalías congénitas desde la inclusión en el sistema de vigilancia Sivigila en Colombia 2010-2013. *Universitas Médica* 58(1).
- [4] Ávila T. et al. (2021). La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina II: importancia actual y aplicaciones prácticas. *Atención Primaria* 53(1), 81-88
- [5] Restrepo A. (2018). Diagnóstico prenatal de anomalías congénitas: ¿se cumple esta política en Colombia? *CES Medicina* 32(3), 226-234.
- [6] Suárez V. y Bareño R. (2021). Una mirada a las historias clínicas digitales, la calidad del dato, sus estándares, aspectos de ciberseguridad y su interoperabilidad en Colombia. Ediciones de la U.
- [7] OMS. (2011). International statistical classification of diseases and related health problems CIE10. Organización Mundial de la Salud.
- [8] Ávila A. et al. (2019). Análisis de los defectos congénitos en Colombia 2015-2017. *Salud UIS* 51(3), 202-208.
- [9] INS. (2022). Mortalidad perinatal y neonatal tardía. Instituto Nacional de salud Recuperado.
- [10] Liu Q. et al. (2020). Health communication through news media during the early stage of the Covid-19 outbreak in China: Digital topic modeling approach. *Journal of medical Internet research* 22(4), e19118.
- [11] Sharma V. et al. (2017). An agile group aware process beyond CRISP-DM: A hospital data mining case study. En *International Conference on Compute and Data Analysis*.
- [12] Sharma V. et al. (2017). An agile group aware process beyond CRISP-DM: a hospital data mining case study. En *International Conference on Compute and Data Analysis*.
- [13] Martínez F. et al. (2019). CRISP-DM twenty years later: From data mining processes to data science trajectories. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*.
- [14] Cutipa R. y Carbajal R. (2019). Modelo basado en minería de datos para predecir la condición de salud de los recién nacidos en la Red de Salud Chucuito-Juli en el periodo 2016-2018. *Press*.
- [15] Zhang X. et al. (2017). Grandes datos science: Opportunities and challenges to address minority health and health disparities in the 21st century. *Ethnicity & disease* 27(2), 95.
- [16] Ong C. et al. (2017). Dynamic-ETL: A hybrid approach for health data extraction, transformation and loading. *BMC medical informatics and decision making* 17(1), 1-12.
- [17] Tapia P. et al. (2020). Business Intelligence aplicado al sector Salud. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía* 5(3), 622-650.
- [18] Bi Y. et al. (2020). Online state of health and aging parameter estimation using a physics-based life model with a particle filter. *Journal of Power Sources* 476, 228655.
- [19] Bui C. et al. (2017). Time series forecasting for healthcare diagnosis and prognostics with the focus on cardiovascular diseases. En *International conference on the development of biomedical engineering in Vietnam*. Singapore.
- [20] Kaushik S. et al. (2020). AI in healthcare: time-series forecasting using statistical, neural, and ensemble architectures. *Frontiers in grandes datos* 3, 4.
- [21] Swamynathan M. (2019). *Mastering machine learning with python in six steps: A practical implementation guide to predictive data analytics using python*. Apress.

- [22] Guleria P. y Sood M. (2020). Intelligent Learning Analytics in Healthcare Sector Using Machine Learning. Springer.
- [23] López A. et al. (2019). E-Health system for the monitoring, transmission and storage of the arterial pressure of chronic-hypertensive patients. En Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería. IEEE.
- [24] Raschka S. y Mirjalili V. (2017). Python machine learning: machine learning and deep learning with Python. Scikit-Learn and TensorFlow.
- [25] Kubben P. et al. (2019). Fundamentals of clinical data science. Press.
- [26] Hripcsak G. et al. (2015). Observational health data sciences and informatics (OHDSI): Opportunities for observational researchers. Studies in health technology and informatics 216, 574.
- [27] Del Río R. et al. (2020). Predicción de mortalidad en recién nacidos prematuros. Revisión sistemática actualizada. Anales de Pediatría 93(1), 24-33.
- [28] Fariña D. et al. (2012). Mortalidad neonatal: Análisis causa raíz. Estudio prospectivo de los factores vinculados a la muerte de recién nacidos internados en maternidades seleccionadas del sector público de la república argentina. Revista del Hospital Materno Infantil Ramón Sardá 31(3), 117-124.

Impacto del método Attribute-Driven Design ADD 3.0 en la definición de arquitecturas de software

Carlos Andrés Arboleda Suaza¹

Jorge Eliecer Giraldo Plaza²

Adriana Xiomara Reyes Gamboa³

¹ *Universidad de San Buenaventura*

^{2,3} *Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid*
Colombia

Este capítulo se enfoca en identificar el impacto del método ADD 3.0 en la definición de arquitecturas dentro de los procesos de desarrollo de software, mediante el uso del método Attribute-Driven Design ADD a partir de la identificación de sus principales características y de la masificación en su uso, debido a la popularidad y a las características y ventajas ofrecidas para agilizar el proceso de arquitectura y diseño de soluciones tecnológicas. La metodología empleada para identificar la masificación en el uso de este método es una encuesta cuantitativa, para medir el nivel del conocimiento conceptual y selección de diferentes patrones, métodos y metodologías arquitectónicas, en un grupo poblacional compuesto por profesionales en la arquitectura, diseño y el desarrollo de software del área metropolitana de Medellín, Colombia. Como resultado se identifica la masificación en su uso y preferencia en su adopción por parte de los profesionales a nivel académico y laboral, y también el impacto que tiene el método, en conjunción con otras herramientas y técnicas arquitectónicas, en el desarrollo de software profesional y para la obtención de una arquitectura base fundacional candidata a ser implementada en un sistema, con el propósito de que cumpla la promesa propuesta en el mínimo producto viable para la etapa de diseño del software.

¹ Ingeniero de Sistemas y Especialista en Seguridad Informática.

Contacto: carlos_suaza54182@elpoli.edu.co, carlos.arboleda@usbmed.edu.co

² Ingeniero de Sistemas, Magíster en Ingeniería de Sistemas y Doctor en Ingeniería de Sistemas e Informática.

Contacto: jegiraldo@elpoli.edu.co

³ Ingeniera de Sistemas, Especialista en Teleinformática, Magíster en Ciencias Computacionales y Doctora en Ingeniería de Sistemas e Informática.

Contacto: axreyes@elpoli.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Debido al creciente auge en las nuevas tecnologías para el desarrollo de software, plataformas, marcos de trabajo y lenguajes de programación, la importancia de estandarizar el ejercicio de la construcción de software a nivel profesional ha adquirido una gran relevancia, así como también la correcta implementación de una Arquitectura de Software y un Diseño de Software acorde a las necesidades empresariales.

La IEEE define a la Arquitectura de Software como la organización fundamental de un sistema encarnada en sus componentes, las relaciones entre ellos y el ambiente, y los principios que orientan su diseño y evolución [1], a su vez también define a la Ingeniería del Software como la aplicación de una estrategia sistemática, disciplinada y cuantificable al desarrollo, aplicación y mantenimiento del software; esto es, la aplicación de la ingeniería al software [2].

[3] exponen los principales beneficios que debe cumplir una arquitectura de software, los cuales son servir como marco de referencia para satisfacer los requisitos, ser una base técnica y gerencial para el diseño y gestión de costos, ser reutilizable, evolutiva y escalable y finalmente ser la base para el análisis de la dependencia y consistencia.

La arquitectura de software es la disciplina que se encarga de la definición a alto nivel de un sistema desde su punto de vista estructural, se enfoca en el cumplimiento de los objetivos del software a partir del cumplimiento de las decisiones estrategias de diseño, seguimiento de lineamientos, cumplimiento de reglas y patrones que enmarcan el diseño y la implementación del software.

El Software Engineering Institute SEI refiere a la Arquitectura de Software como a *las estructuras de un sistema, compuestas de elementos de software con propiedades visibles de forma externa y las relaciones que existen entre ellos* [4].

El diseño de software por su parte se encarga del ejercicio de la implementación del software a bajo nivel, enfocándose en los detalles específicos de la construcción de la solución a partir de las decisiones adoptadas por la Arquitectura de Software, haciendo uso de las teorías, métodos y herramientas necesarias para el desarrollo profesional del software. Durango [5] se refiere a la disciplina como *es tanto el proceso de definición de la arquitectura, módulos, interfaces y otras características de un sistema como el resultado de ese proceso*.

Para el cumplimiento de sus propósitos, ambas disciplinas (la arquitectura y el diseño de software), se apoyan en el uso de patrones, métodos y metodologías, las cuales brindan, al profesional del software, las herramientas necesarias para lograr el objetivo de alinear la resolución de las problemáticas del negocio, con la implementación de las soluciones de software.

Los patrones arquitectónicos o patrones de Arquitectura, son las estructuras de diseño requeridas para la construcción de software, las cuales su validez y eficacia ya ha sido probada y validada, permitiendo así tener un marco de referencia tecnológico para la construcción de nuevas soluciones de software, algunos de los más comunes son el patrón Modelo-Vista-Controlador y el patrón Cliente-Servidor, entre otros, [6] define los siguientes patrones principales de arquitectura de software: Microkernel, Microservicio, Arquitectura en Capas, Basado en el Evento y Basado en el Espacio.

Los métodos arquitectónicos son aquellos marcos de referencia conceptuales que permiten tener una visión de la arquitectura apoyándose en los requisitos del negocio y sirven de apoyo al arquitecto y diseñador de software para cerrar la brecha de abstracción entre la definición de la problemática y la implementación de la solución de software, los más comunes son el Diseño Basado en Atributos ADD y el Diseño Basado en el Dominio DDD, entre otros.

Algunos tienen como objetivo la generación de una arquitectura que responda a un conjunto de requisitos iniciales. Otros están dirigidos a evaluar configuraciones arquitectónicas ya existentes para escoger la mejor de acuerdo a un conjunto de requisitos. Todos se ubican en las fases tempranas del proceso de diseño de software y en la actualidad son considerados parte esencial del mismo [7].

Las metodologías arquitectónicas permiten la gestión de equipos de trabajo para el desarrollo de software de manera ágil a partir de procesos documentados, iterativos e incrementales, las metodologías usadas más populares han sido el Proceso Unificado Racional RUP, Programación Extrema XP y SCRUM. La metodología para el desarrollo de software es un modo sistemático de realizar, gestionar y administrar un proyecto para llevarlo a cabo con altas posibilidades de éxito. Una metodología para el desarrollo de software comprende los procesos a seguir sistemáticamente para idear, implementar y mantener un producto software desde que surge la necesidad del producto hasta que cumplimos el objetivo por el cual fue creado [8].

ADD es un método sistemático que permite el diseño de una Arquitectura de Software enfocándose en el proceso de diseño de los requisitos del software mediante los atributos de calidad, requisitos funcionales, requisitos no funcionales y restricciones. ADD originalmente fue desarrollado por el SEI Software Engineering Institute en 2000, la versión ADD 2.0 fue publicada en el 2006 y la versión ADD 3.0 fue publicada en 2016, la cual se enfoca en mejorar la adopción por parte de los profesionales de la arquitectura de software para alinearla con la forma en que se desarrolla en software en la actualidad [9].

ADD 3.0 como método para la definición de arquitecturas de software permite mediante el análisis de los atributos de calidad definidos en la fase de levantamiento de requisitos, obtener una arquitectura inicial-base del sistema, así como también la identificando y clasificación de módulos y componentes. ADD sigue un proceso de diseño recursivo que permite descomponer un sistema o elementos de un sistema, aplicando tácticas y patrones arquitectónicos que satisfagan los requisitos de calidad, siguiendo el ciclo [10]:

- *Planear*: Los atributos de calidad y las restricciones de diseño son consideradas para seleccionar qué tipos de elementos se utilizan en la arquitectura.
- *Hacer*: Los elementos son instanciados para satisfacer los atributos de calidad, así como los requisitos funcionales.
- *Verificar*: El resultado es analizado para determinar si los requisitos son satisfechos.

Este proceso se repite hasta que se cumplen todos los requisitos arquitectónicamente significativos. ADD se implementa a partir de 3 momentos, los cuales involucran las entradas de información, el proceso iterativo y a salida que corresponde al diseño arquitectónico. Las entradas de información comprenden el propósito de diseño, los requisitos funcionales primarios, los escenarios de atributos de calidad, las restricciones y las preocupaciones arquitectónicas.

El proceso Iterativo está compuesto por la revisión de las entradas de información, el establecimiento de objetivos a partir de conductores, la selección de los elementos del sistema a refinar, escoger un Diseño que satisfaga esos conductores seleccionados, la asignación de responsabilidades y definición de interfaces, el diseño y almacenamiento de las decisiones arquitectónicas en UML y el analizar de ese diseño, la revisión del cumplimiento de los objetivos y, por último, la salida comprende un diseño de la arquitectura de software. Si se requiere refinar ese diseño, se itera nuevamente todo el proceso.

2. MARCO REFERENCIAL

La arquitectura se define como la organización fundamental de un sistema, encarnada en sus componentes, las relaciones entre ellos y con su entorno, y los principios que gobiernan su diseño y evolución. Los elementos que resultan definitorios en la utilidad, costo y riesgo de un sistema son en ocasiones físicos y otras veces lógicos [11].

Los usuarios finales de software enfocan sus esfuerzos en velar por la aplicación de los atributos de calidad perceptibles del software, tales como la disponibilidad, eficiencia, flexibilidad, integridad, interoperabilidad, confiabilidad, robustez y usabilidad, pero dejan de lado otros tipos de atributos de calidad intrínsecos que todo software debe cumplir, como lo es la mantenibilidad, portabilidad, reusabilidad, comprobabilidad, gestionabilidad y seguridad, estos atributos de calidad tienen visibilidad a nivel de la arquitectura de software y es una responsabilidad del arquitecto y desarrollador velar por su definición y garantizar su

aplicación mediante el uso de buenas prácticas que involucren el uso de patrones de arquitectura de software SA y metodologías ADD.

Algunos trabajos relacionados con la definición de arquitecturas de referencia empresariales son: [12] que proponen una arquitectura de referencia para el internet de las cosas; [13] donde se define una arquitectura para computación en la nube; [14] diseñan una arquitectura de referencia orientada a servicios seguros; y [15] proponen una arquitectura de referencia para los sistemas de gestión de procesos de negocio. Como lo indica [16], en la actualidad se busca que los estilos de arquitectura sean lo más genéricos posibles, adicionalmente que permitan una interconexión exitosa entre los diferentes componentes y las diferentes tecnologías relacionadas para la solución determinada. En [11] se propone una serie de conceptos fundamentales a tener en cuenta para articular una arquitectura de referencia, tales conceptos son:

- *Los estilos*: los cuales definen una forma de articulación u organización arquitectónica, los *Lenguajes de Descripción Arquitectónica ADL*: que permiten modelar una arquitectura mucho antes que se lleve a cabo la programación de las aplicaciones que la componen, analizar su adecuación, determinar sus puntos críticos y eventualmente simular su comportamiento.
- *Los marcos de trabajo y vistas*: como los marcos arquitectónicos como las metodologías de modelado de los organismos acostumbran a ordenar las diferentes perspectivas de una arquitectura en términos de vistas. La mayoría de los marcos de trabajo y estrategias reconoce entre tres y seis vistas aproximadamente.
- *Los procesos y metodologías*: las vistas estáticas se corresponden con las perspectivas particulares de los diferentes participantes, mientras que las vistas dinámicas tienen que ver con etapas del proceso, ciclo de vida o metodología, caracterizadas como requerimiento, análisis, diseño (o construcción, o modelado), implementación, integración (prueba de conformidad, *testing*, evaluación),
- *La abstracción*: consiste en extraer las propiedades esenciales, o identificar los aspectos importantes, o examinar selectivamente ciertos aspectos de un problema, posponiendo o ignorando los detalles menos sustanciales, distractivos o irrelevantes.
- *Los escenarios*: conocidos también como guiones o libretos, han sido básicamente técnicas que se implementan en la elicitación de los requisitos, particularmente en relación con los operadores de sistemas, también se han utilizado como método para comparar alternativas de diseño.

[17] describen un modelo de referencia como un marco abstracto para comprender relaciones significativas entre las entidades de algún entorno. Permitiendo el desarrollo de arquitecturas concretas usando estándares consistentes y especificaciones que soporten ese ambiente. Un modelo de referencia consiste en un conjunto de conceptos unificados, axiomas y relaciones dentro de un problema específico, independiente de estándares, tecnologías, implementaciones u otros detalles concretos

Con el propósito de solucionar la necesidad de representar las diferentes planos o vistas que abarcan una arquitectura de referencia de software, [18] propone Modelo de 4+1 vistas de la Figura 1.

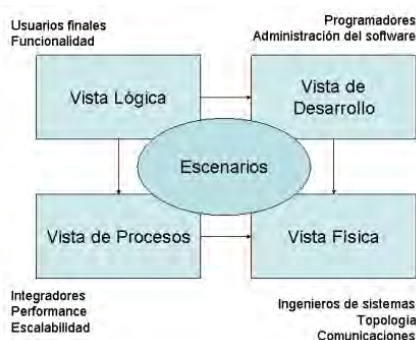


Figura 1. Modelo de Definición de Arquitectura 4+1 Vistas [18]

Propone que la arquitectura de software se trata de abstracciones, de descomposición y composición, de estilos y estética. También tiene relación con el diseño y la implementación de la estructura de alto nivel del software. Los diseñadores construyen la arquitectura usando varios elementos arquitectónicos elegidos apropiadamente. Estos elementos satisfacen la mayor parte de los requisitos de funcionalidad y ejecución del sistema, así como también otros requisitos no funcionales tales como confiabilidad, escalabilidad, portabilidad y disponibilidad del sistema.

La arquitectura de software típicamente juega un rol de puente entre los requisitos y el código [19], a partir de los requisitos es que se logra identificar cual es la promesa de funcionamiento del software y cuales atributos de calidad deben ser considerados en la etapa de análisis y diseño (Figura 2).

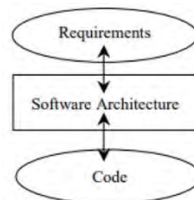


Figura 2. Arquitectura de Software como Puente [19]

Para realizar el diseño de una arquitectura de software para un sistema, el Software Engineering Institute SEI propone el modelo Attribute Driven Design ADD. El método comprende un proceso recursivo que descompone el sistema o elemento del sistema aplicando las tácticas y patrones arquitecturales que buscan satisfacer los requisitos de atributos de calidad. De esta manera y a través de un proceso iterativo se pretende alcanzar con un diseño sólido de la arquitectura de software del sistema [20]. ADD 3.0 permite definir una arquitectura de software en la cual el proceso de diseño se apoya en los atributos de calidad, permitiendo descomponer un sistema en elementos, mediante la aplicación de tácticas y patrones que satisfagan esos requisitos. El método ADD está compuesto por los pasos de la Figura 3.

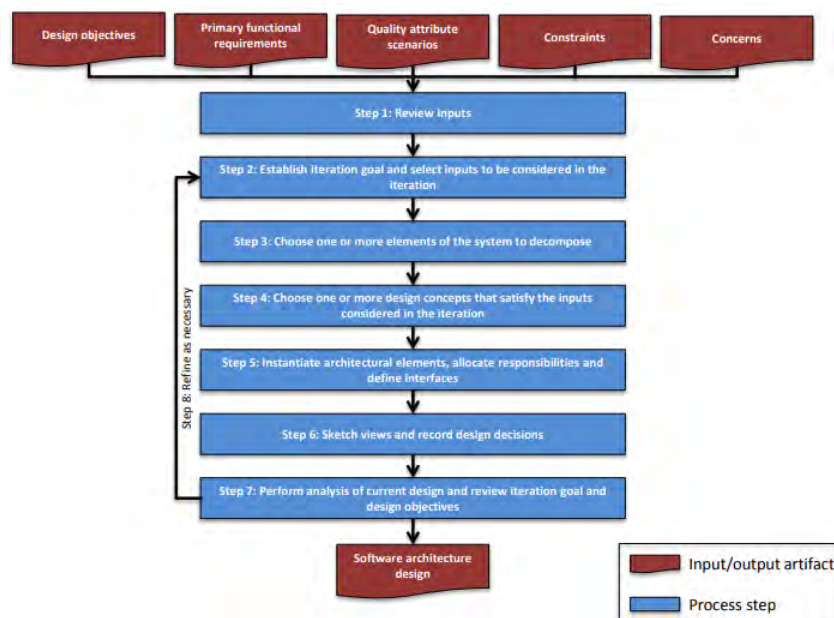


Figura 3. Pasos del método Attribute-Driven Design ADD 3.0

- Paso 1: Revisión de entradas.
- Paso 2: Establecer objetivos iterativos y seleccionar las entradas a ser consideradas en la iteración.
- Paso 3: Escoger uno o más elementos del sistema a descomponer.
- Paso 4: Escoger uno o más conceptos de diseño que satisfagan las entradas de la iteración.
- Paso 5: Crear instancias de elementos arquitectónicos, asignar responsabilidades y definir interfaces.
- Paso 6: Diseñar vistas y registrar decisiones de diseño.
- Paso 7: Realizar análisis del diseño actual y revisar la meta de iteración y los objetivos de diseño.
- Paso 8: Repetir los pasos del 2 al 7 para los demás elementos del sistema a descomponer.

Es importante que los atributos de calidad candidatos a ser implementados en ADD, hayan sido refinados y priorizados por los interesados según las metas propuestas de negocio, adicionalmente que estos atributos de calidad se encuentren definidos específicamente como escenarios de calidad.

3. MÉTODO

El método para conocer la percepción en el uso de la arquitectura y diseño de software (patrones, métodos y metodologías) para una solución tecnológica, fue la realización de una encuesta con énfasis cualitativo, la cual fue publicada en la plataforma de Google Forms, mediante el uso de la metodología Likert con las opciones de respuesta: totalmente de acuerdo, de acuerdo, ni de acuerdo ni en desacuerdo, en desacuerdo y totalmente en desacuerdo. Las escalas de valor y de estimación tipo Likert son aquellas que se utilizan para determinar la percepción de alguna variable cualitativa que por su naturaleza denota algún orden [21].

Se realizaron 8 preguntas divididas en las siguientes temáticas: 1) impacto de la arquitectura y diseño de software en una solución tecnológica, 2) el entendimiento en el uso y aplicación de patrones arquitectónicos, 3) consideración de la relevancia en el uso de métodos arquitectónicos, y 4) la relevancia en el uso de las metodologías ágiles para el diseño de software, por parte del rol del arquitecto, diseñador y desarrollador de software. La población objetivo de estudio será un conjunto de personas que reúnan el perfil técnico requerido a ser estudiado, y se enfocará en profesionales del área de la tecnología del desarrollo de software que ejerzan el rol de arquitectos, diseñadores, desarrolladores y líderes técnicos.

4. RESULTADOS

4.1 Arquitectura y diseño de software

El propósito de estas preguntas busca identificar si el profesional en el área tiene claros los conceptos de arquitectura y diseño, así como también el impacto de su implementación en un proyecto de software.

- *¿Considera que la definición de la arquitectura de software tiene un impacto positivo en una solución tecnológica?*

Como resultado se observa en la Figura 4, que el 87,5% de los encuestados está totalmente de acuerdo, mientras que el 12,5% indica que se encuentra totalmente en desacuerdo, con el impacto positivo de la arquitectura de software para una solución tecnológica. Este resultado indica que la adopción de los conceptos relacionados con la arquitectura y el diseño de software se encuentran ampliamente aceptado y adoptado por los especialistas del área de tecnología para el desarrollo de software a nivel profesional.

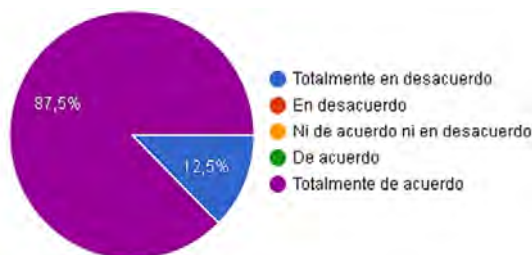


Figura 4. Encuesta Arquitectura y Diseño Pregunta 1

- *¿Considera que la definición del diseño de software tiene un impacto positivo en una solución tecnológica?*

Se observa en la Figura 5 que el 75% de los encuestados está totalmente de acuerdo, mientras que un 12,5% se encuentra de acuerdo y un 12,5% indica que se encuentra totalmente en desacuerdo, con el impacto positivo del diseño de software para una solución tecnológica. Este resultado indica que, aunque sigue siendo ampliamente aceptado y adoptado el diseño de software por parte de los especialistas, en algunos casos no se considera indispensable su aplicabilidad, debido a los acuerdos de entrega de artefactos de diseño con el cliente por parte del especialista de software, así como también los tiempos asignados para esta actividad y la experiencia en el desarrollo del área de tecnología.



Figura 5. Encuesta Arquitectura y Diseño Pregunta 2

4.2 Patrones arquitectónicos

El propósito de estas preguntas busca identificar si el profesional en el área identifica e implementa algunos de los patrones técnicos más comunes en las arquitecturas de software actuales.

- *¿Qué opina acerca de que el uso del patrón arquitectónico para el de diseño de software MVC es uno de los más usados para ser aplicado en la definición de una solución web?*

Como resultado se observa en la Figura 6, que el 62,5% de los encuestados está de acuerdo, mientras que un 25% se encuentra totalmente de acuerdo y un 12,5% indica que se encuentra ni de acuerdo ni en desacuerdo, con la popularidad en el uso del patrón MVC en la definición de una solución web. Se interpreta en este resultado, que aunque MVC – Modelo Vista Controlador, es uno de los patrones para el desarrollo de software más populares y masificados para las soluciones web, en algunos proyectos se puede usar otras alternativas tales como el patrón de agentes para soluciones de arquitectura orientada a servicios SOA basadas en microservicios, así como también para el desarrollo en dispositivos móviles donde se pueden usar otros patrones más especializados, tales como Modelo Vista Presentación MVP, Modelo Vista Vista Modelo MVVM, entre otros.



Figura 6. Encuesta Patrones Arquitectónicos Pregunta 3

- *¿Considera que el uso del patrón arquitectónico para el de diseño de software Cliente-Servidor no es apropiado para ser aplicado en la definición de una solución distribuida?*

Se observa en la Figura 7, que el 50% de los encuestados está de acuerdo, mientras que un 12,5% se encuentra totalmente de acuerdo, un 12,5% indica que se encuentra ni de acuerdo ni en desacuerdo, un 12,5% en desacuerdo y un 12,5% totalmente en desacuerdo con la aplicación del patrón Cliente – Servidor para una solución distribuida. El resultado de esta pregunta indica un punto medio de aceptación en la concepción por parte de los especialistas y profesionales en el desarrollo de software, para el uso y aplicabilidad del patrón Cliente-Servidor, en su mayoría debido a la masificación en la oferta de soluciones Out-Premise, así como también la acogida a nivel personal y empresarial de las plataformas en la nube con esquemas públicos, privados e híbridos.



Figura 7. Encuesta Patrones Arquitectónicos Pregunta 4

4.3 Métodos arquitectónicos

Estas preguntas buscan identificar si el profesional en el área conoce los métodos arquitectónicos más comunes y masificados para el diseño de software, así como también si identifica sus diferencias.

- *¿Considera que el uso del método arquitectónico para el de diseño de software ADD se encuentra muy masificado, para la definición de una solución tecnológica?*

Los resultados de la Figura 8, indican que el 50% de los encuestados se encuentran ni de acuerdo ni en desacuerdo, un 37,5% está de acuerdo y un 12,5% totalmente de acuerdo con la masificación en la aplicación de ADD para la definición de una solución tecnológica. Los resultados indican que, aunque el método ADD es muy popular y su proceso está bien documentado, su aplicación en proyectos aún no está muy masificado y adicionalmente no se considera como un factor determinante para el éxito o fracaso en la definición arquitectónica para el diseño de software de una solución tecnológica.



Figura 8. Encuesta Métodos Arquitectónicos Pregunta 5

- *¿Considera que el uso del método arquitectónico para el de diseño de software DDD se encuentra muy masificado, para la definición de una solución tecnológica?*

En la Figura 9 se indica que el 50% de los encuestados se encuentran ni de acuerdo ni en desacuerdo, un 25% está totalmente de acuerdo, un 12,5% de acuerdo y un 12,5% en desacuerdo, con la masificación en la aplicación de DDD para la definición de una solución tecnológica. Tanto los métodos ADD como DDD, son métodos profesionales para las definiciones arquitectónicas, esto indica que su aplicabilidad depende del perfil del arquitecto, así como también del presupuesto asignado por parte de los interesados del proyecto para esta actividad, se entiende, por tanto, que su masificación va de la mano con el tiempo y los recursos especializados asignados para estas actividades arquitectónicas.



Figura 9. Encuesta Métodos Arquitectónicos DDD Pregunta 6

4.4 Metodologías arquitectónicas

El propósito de estas preguntas busca identificar si el profesional en el área tiene claridad sobre las metodologías arquitectónicas más comunes para la gestión de los proyectos de software y que tan relevante ha sido su aporte en el éxito de los proyectos.

- *¿Se ha transformado el rol del arquitecto de software con el auge de las metodologías arquitectónicas para el diseño de software?*

En la Figura 10 se indica que el 37,5% de los encuestados están de acuerdo, un 25% está totalmente de acuerdo, un 25% está ni de acuerdo ni en desacuerdo y un 12,5% en desacuerdo, con la transformación

del rol del arquitecto de software a partir del auge de las metodologías arquitectónicas para el diseño de software. En muchos casos el rol del arquitecto de software va juntamente con otras actividades, tales como gestión, diseño, desarrollo y seguimiento al proyecto, en parte debido a su nivel de experticia, por esta razón el rol del arquitecto amplió su campo de acción y también sus responsabilidades, de cara a la consecución del éxito del proyecto.



Figura 10. Encuesta Metodologías Arquitectónicas Preguntas 7

- ¿El diseño arquitectónico es relevante en proyectos que se gestionan con metodologías arquitectónicas ágiles como SCRUM?

La Figura 11 indica que un 50% de los encuestados están totalmente de acuerdo, un 37,5% están de acuerdo y un 12,5% está ni de acuerdo ni en desacuerdo, con la relevancia del diseño arquitectónica en proyectos gestionados con metodologías ágiles tales como SCRUM. Uno de los pilares de la promesa de agilismo presentada por SCRUM se fundamenta precisamente en la claridad del diseño, a partir de este insumo se puede garantizar que los tiempos pactados de entrega de artefactos se cumplan en los plazos estipulados, es a razón de esto que los artefactos de diseño Arquitectónicos son insumos indispensables para garantizar el agilismo en metodologías arquitectónicas, como SCRUM.



Figura 11. Encuesta Metodologías Arquitectónicas Preguntas 8

5. DISCUSIÓN

El software resultante para un proyecto de software que se aborda a partir del método ADD es el reflejo de los requisitos de los interesados los cuales se apoyan en la cadena de valor de la empresa, a partir de allí, se debe tener claridad en la identificación eficientemente los procesos candidatos a ser sistematizados, ya que estos atributos y requisitos de calidad correctamente implementados sobre una arquitectura a ser diseñada, garantizará el éxito de la solución final.

Un gran porcentaje de profesionales en el área del desarrollo de software comparten y apoyan la importancia y relevancia del uso de la arquitectura y diseño de software como un pilar fundamental en la consecución de los resultados de un proyecto.

Al ser los requisitos un insumo fundamental para el método ADD, se necesita un alto nivel de profesionalismo por parte de los especialistas en el levantamiento de requisitos funcionales y no funcionales, ya que de estos depende la correcta implementación de la arquitectura mediante ADD.

El uso de patrones arquitectónicos comunes, tales como Modelo Vista Controlador, Cliente-Servidor, Agente, Multi Nivel y Multi Capa, se ven afectados positivamente por el uso de un diseño ADD, ya que este se enfoca en la implementación de atributos de calidad genéricos los cuales son aplicados en muchos patrones, tales como la seguridad, compatibilidad, portabilidad, etc.

El método ADD se enfoca en la generación de un diseño que cumpla la promesa de un promover la alta cohesión, con un bajo acoplamiento, permitiendo que el software final implemente los principales atributos de calidad según los requisitos propuestos, tales como funcionalidad, rendimiento, compatibilidad, usabilidad, fiabilidad, seguridad, mantenibilidad, portabilidad, entre otros.

Un amplio grupo de profesionales en el desarrollo de software tiene claridad sobre la existencia del método ADD, así como también DDD entre otros métodos populares y reconocen su importancia y relevancia en el propósito de la definición del diseño de la arquitectura base de todo proyecto.

ADD no garantiza el éxito de un proyecto de software, ya que tiene una fuerte dependencia con la claridad en el levantamiento de requisitos, a partir de esta dependencia, se debe hacer énfasis en esta etapa, para que este insumo logre su propósito y se vea reflejado en la arquitectura de diseño candidata.

Las actuales metodologías de gestión ágil de proyectos más populares tales como SCRUM, tienen embebidos en sus actividades, los procesos más fundamentales para garantizar el éxito en el diseño de la arquitectura sin perder su promesa de agilidad, tales como el levantamiento de los requisitos funcionales, no funcionales, y su aplicabilidad en el diseño fundacional del proyecto.

El uso de ADD no requiere una curva alta de aprendizaje, ya que es un método que se encuentra inherente en el ciclo de vida del desarrollo de software, el cual en la actualidad está enfocado en el levantamiento y sistematización de los requisitos funcionales y no funcionales a partir de la resolución de los atributos de calidad Internos y Externos de todo software.

6. CONCLUSIONES

Con el método ADD se puede obtener una arquitectura base fundacional candidata a ser implementada en un sistema, con el propósito de que esta cumpla la promesa propuesta en el mínimo producto viable para la etapa de diseño del software.

ADD está en la capacidad de reducir el riesgo relacionado con las capacidades tecnologías y experiencia profesional del arquitecto, al brindarle un mapa de ruta para la construcción del diseño de la arquitectura de software estandarizado.

ADD permite hacer uso de los atributos de calidad, así como también los requisitos funcionales y no funcionales, como base fundamental para los diseños conceptuales de la arquitectura de software.

El diseño de la arquitectura de software es la base fundamental para la creación de sistemas que cumplan requisitos de calidad de manera estandarizada y normalizada, con el propósito de cumplir normatividades y reglamentaciones exigidas para la producción y comercialización de software a nivel internacional.

Los atributos de calidad, así como también los requisitos funcionales y no funcionales muchas veces no son abordados a profundidad desde la concepción del diseño arquitectónico, es una obligación de parte del arquitecto analizar y revisar los impactos de estos atributos y requisitos desde el momento del diseño de la arquitectura y no en las etapas posteriores correspondientes al ciclo de vida del desarrollo del software.

Usar ADD como método para la definición de la arquitectura del diseño de software no garantiza el éxito de la implementación final de la solución de software por sí solo, si no se abordan de manera efectiva todos los atributos y requisitos, así como también velar por el cumplimiento de cada una de las etapas del ciclo de vida del desarrollo del producto de software.

Attribute-Driven Design es un método muy usado en la actualiza por profesionales en el desarrollo de software, debido a que está enfocado en los atributos de calidad, los cuales su identificación es un requisito fundamental por parte de los analistas en el levantamiento de requisitos, para las metodologías de gestión ágil de proyectos más usadas tales como SCRUM.

REFERENCIAS

- [1] IEEE. (2000). Recommended practice for architectural description of software intensive systems IEEE. Std 1471-2000 IEEE.
- [2] IEEE. (1990). Standard glossary of software engineering terminology IEEE. Std 610.12-1990 IEEE.
- [3] Perry D. y Wolf A. (1992). Foundations for the study of software architecture. *Software engineering notes* 17(4), 40-52.
- [4] Kotov A. y Klein J. (2021). Software architecture principles and practices overview training. SEI Carnegie-Mellon University.
- [5] Durango A. (2014). Diseño de software. IT campus academy.
- [6] Richards M. (2015). Software architecture patterns. O'Reilly Media.
- [7] Losavio F. y Guillén C. (2010). Comparación de métodos para la arquitectura del software: un marco de referencia para un método arquitectónico unificado. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela* 25(1), 71-87.
- [8] Maida E. y Pacienza J. (2015). Metodologías de desarrollo de software. McGraw-Hill.
- [9] Kazman R. et al. (2016). Tutorial summary for designing software architectures using ADD 3.0. En 13th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture. IEEE.
- [10] Bass L. et al. (2003). Software architecture in practice. Addison-Wesley.
- [11] Reynoso C. (2004). Introducción a la Arquitectura de Software. Universidad de Buenos Aires.
- [12] Weyrich M. y Ebert C. (2015). Reference architectures for the internet of things. *IEEE Software* 33(1), 112-116.
- [13] Liu F. et al. (2011). Cloud computing reference architecture. NIST special publication 500(2011), 1-28.
- [14] Kalantari A. et al. (2013). A service oriented security reference architecture. *International Journal of Advanced Computer Science and Information Technology* 1, 25-31.
- [15] Pourmirza S. et al. (2019). BPMS-RA: A novel reference architecture for business process management systems. *Transactions on Internet Technology* 19(1), 1-23.
- [16] Garlan D. y Shaw M. (1993). An introduction to software architecture. *Advances in software engineering and knowledge engineering*.
- [17] Mackenzie C. et al. (2006). Reference model for service-oriented architecture 1.0. OASIS standard 12(S18).
- [18] Kruchten P. (1995). The 4+ 1 view model of architecture. *IEEE software* 12(6), 42-50.
- [19] Garlan D. (2001). Software architecture. Press.
- [20] Wojcik R. et al. (2006). Attribute-driven design (ADD), version 2.0. Carnegie-Mellon University.
- [21] Canto Á. et al. (2020). Escala de Likert: Una alternativa para elaborar e interpretar un instrumento de percepción social. *Revista de la alta tecnología y sociedad* 12(1).

Diseño de una aplicación web para la atención de usuarios a partir de la metodología de desarrollo tecnológico

Nancy Tavera Castillo¹
Cesar Augusto López Cortés²
Ernesto Solano Hernández³
Jesús Guillermo Banquez Mendoza⁴
Unidades Tecnológicas de Santander
Colombia

En este capítulo se describe el diseño de una aplicación web para la atención de beneficiarios del programa Más Familias en Acción MFA, del municipio de Piedecuesta, Colombia. Se parte de la metodología de desarrollo tecnológico y los lineamientos y estrategias del Gobierno Digital. La aplicación sirve principalmente como medio para mantener informados a los beneficiarios: 1) de las actividades relacionadas con el programa: avances, eventos, servicios, fechas de inscripciones, horarios de atención, información de los funcionarios del programa, 2) utilizar diferentes mecanismos de participación ciudadana, y 3) servir de canal de comunicación virtual. El diseño incluye imágenes propias del programa y relacionadas con el mismo, animaciones e información relevante para los beneficiarios del programa. Además, cuenta con módulos de registro de usuarios, inicio de sesión, calendario personalizado con los eventos a realizarse cada día, el módulo de registro y actualización de datos personales y fotografía de los beneficiarios.

¹ Ingeniera de Sistemas y Magíster en Gestión de la Tecnología Educativa.

Contacto: ntavera@correo.uts.edu.co.

² Tecnólogo en Desarrollo de Sistemas Informáticos, Ingeniero Mecatrónico y Especialista en Telecomunicaciones.

Contacto: cesarlopez-1@hotmail.com

³ Ingeniero de Sistemas, Magíster en Tecnología Educativa y Estudiante de Doctorado en Tecnología Educativa.

Contacto: esolano@correo.uts.edu.co

⁴ Magíster en Desarrollo Social y Estudiante de Doctorado en Ciencias Sociales.

Contacto: jbanquez@correo.uts.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las Tecnologías de la Información y la Comunicación TIC conllevaron al Estado a asumir el reto en su implementación en el sector público, a partir de lo cual generó varias políticas, lineamientos y estrategias que permitieron establecer parámetros en la construcción de sitios web y aplicaciones para la realización de trámites, brindar información al usuario, abrir espacios de participación ciudadana, establecer un modelo de seguridad, guías y manuales para la innovación de todas las entidades y organismos estatales, aplicable no solo a los procesos sino a los proyectos y programas a desarrollar.

Dentro de estos programas se halla comprendido Más Familias en Acción MFA, el cual otorga subsidios en salud, educación y nutrición, para niños de familias en condiciones de pobreza multidimensional y pobreza extrema, logrando un impacto positivo en la calidad de vida de esta población.

En el municipio de Piedecuesta se atienden a 6.227 familias beneficiarias del programa de forma presencial y telefónica, sin embargo, se presentan debilidades en la atención debido a una infraestructura logística pobre, desconocimiento de los funcionarios, poca atención telefónica e información desactualizada lo que ocasiona demoras e ineficiencia en la provisión de los servicios a la ciudadanía, además el recorrido que deben realizar los titulares y Madres Líderes ML a la oficina, las filas y la espera a la intemperie lo que afecta el bienestar de estas familias [1]

La aplicación web es relevante para las familias beneficiarias del programa MFA de Piedecuesta, por cuanto les permite obtener un canal de comunicación las 24 horas por los 365 días del año, además de ofrecerles información sobre el mismo; recursos educativos y el enlace a otros programas sociales, así como con las entidades y organismos del Estado colombiano.

De acuerdo con los lineamientos del Gobierno Digital (anteriormente Gobierno en Línea GEL), se practicaron las pruebas de funcionalidad, usabilidad, interfaz, compatibilidad, rendimiento y seguridad mediante una lista de chequeo teniendo en cuenta el Modelo de Seguridad y Privacidad de la Información de manera que la información y los derechos de los usuarios se encuentran protegidos, otorgando así confiabilidad a estos durante las interacciones de información con los ciudadanos y otras entidades del sector público y privado

2. MÉTODO

Molina y otros [2] exponen que dentro de las metodologías más utilizadas para el desarrollo de aplicaciones web se encuentra el Object-Oriented Hypermedia Design Model OOHDM, ya que permite reducir el tiempo de desarrollo, reutilizar el diseño, simplificar la evolución y el mantenimiento de la aplicación, los cuales se enfocan principal a la calidad, seguridad, confiabilidad y consistencia de la aplicación. Como se puede observar en la Figura 1, la metodología se realiza en cuatro etapas.

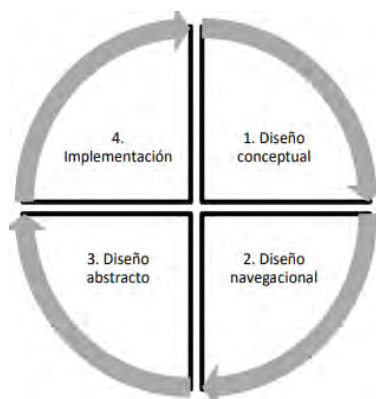


Figura 1. Fases de la Metodología OOHDM

1. *Diseño conceptual*, la cual incluye el levantamiento de información sobre las necesidades del cliente (requisitos), plasmados en diagramas de casos de uso y que deberán tenerse en cuenta para el diseño y desarrollo de la aplicación. Posteriormente se realiza el modelo de clases, con sus respectivos

subsistemas y relaciones para lo cual se aplica el patrón de diseño y la técnica propia de la orientación a objetos.

2. *Diseño navegacional*, hace referencia a la reorganización del modelo conceptual y cómo será mostrada al usuario, está comprendido por diagramas navegacionales y diagramas de contexto.
3. *Diseño abstracto*, comprende la forma en qué será accedida la estructura de navegación, cómo aparecerán, qué y cuáles transformaciones deben realizarse.
4. *Implementación*, en esta fase se implementa el diseño de la aplicación, una vez realizados todos los modelos de las anteriores etapas.

Otra de las metodologías empleadas en el desarrollo web es UML Basado en Ingeniería Web UWE, el cual utiliza diagramas de casos de uso. El desarrollo tecnológico comprendió el uso de herramientas, técnicas, métodos y modelos relacionados con la Ingeniería de Software, la Ingeniería Web y los lineamientos del Modelo de Seguridad y Privacidad de la Información de la estrategia Gobierno Digital. La técnica de recopilación de información fue la encuesta y el instrumento el cuestionario comprendido por 11 preguntas abiertas y cerradas distribuidas en dos apartados: Datos sociodemográficos y generales sobre la atención y acceso a la información. Para la aplicación del instrumento se tomó una muestra de 362 personas del total de población inscrita al programa Más Familias en Acción MAF, la selección se realizó mediante un muestreo no probabilístico. Las fases que hicieron parte del proyecto se describen a continuación:

- *Fase 1.* Definición de requisitos, durante la cual se realizó una investigación de requisitos a fin de establecer los criterios de funcionalidad y desempeño.
- *Fase 2.* Selección de tecnología, lo cual llevó a la comparación y selección de Marcos, servidor, patrón de desarrollo, entre otros aspectos que favorecen su funcionalidad, simplicidad y facilidad de construcción de la aplicación.
- *Fase 3.* Diseño del sistema, que comprendió el análisis de configuración del sistema que llevó a la selección del modelo relacional, el gestor de bases de datos, las funcionalidades mediante diagramas de casos de uso y diagramas de clase.
- *Fase 4.* Fase de desarrollo, durante la cual se inicia la construcción de la aplicación otorgando así una estructura de carpetas y paquetes organizada bajo el patrón MVC.
- *Fase 5.* Pruebas realizadas al sitio web a fin de garantizar el cumplimiento de estándares en programación y de seguridad.

2.1 Selección de tecnología

Entre los diferentes marcos de trabajo basados en PHP y bajo el patrón de diseño MVC, se encuentran Laravel, Symfony y Codeigniter. La Tabla 1 evidencia la comparación de estos marcos de trabajo.

Tabla 1. Cuadro comparativo de marcos

Marco	Curva de aprendizaje	Comunidad	Ecosistema
Laravel	Curva de aprendizaje de grado medio a fuerte	La mayor en estos momentos. Es sencillo encontrar documentación y resolución a los problemas	Riqueza inigualable
Symfony	Curva de aprendizaje un poco más severa	Excelente, es uno de los marcos más populares de la década	Tienen un buen ecosistema
Codeigniter	Ha mantenido tradicionalmente la curva de aprendizaje más sencilla, por lo que es un buen marco de entrada	Pasó por momentos difíciles, pero ha sido impulsado recientemente de nuevo	Menos potente que los anteriores

El marco de desarrollo seleccionado fue Laravel 5 el cual es un marco de código abierto para el desarrollo de aplicaciones Web en PHP 5 que posee una sintaxis simple, expresiva y elegante; creado en 2011 por Taylor Otwell, inspirándose en Ruby on Rails y Symfony, de los cuales ha adoptado sus principales ventajas. Las tecnologías de código abierto son empleadas en variedad de aplicaciones, encontrándose entre ellas los marcos de desarrollo web [3], cuyo uso también se extiende al sector privado generalmente en empresas pequeñas y medianas, o bien en el sector social (hospitales, clínicas), etc.

Laravel facilita el desarrollo simplificando el trabajo con tareas comunes como la autenticación, el enrutamiento, gestión de sesiones, el almacenamiento en caché, etc.; algunas de sus características y ventajas:

- Patrón MVC (modelo-vista-controlador), establece una estructura organizada del código, es decir, separa la lógica del negocio de los datos y del módulo encargado de procesar los eventos lo que hace su mantenimiento mucho más fácil y permite reutilizarla. De acuerdo con [1] este patrón de arquitectura facilita el desarrollo de aplicaciones y su mantenimiento.
- Posee un sistema de mapeo de datos relacionales denominado Eloquent, mediante el cual pueden realizarse consultas a la base de datos empleando para ello su Query Builder.
- Incorpora un sistema de migraciones que permite controlar las versiones de la base de datos y gestión de las tablas desde el código.
- El sistema de plantillas denominado "Blade", permite alcanzar mayor velocidad al usar la caché, además facilita crear vistas, herencia y secciones.
- Contiene paquetes a los cuales puede añadirse más lo que facilita el desarrollo de la aplicación, ahorra tiempo en la programación y ofrecen mejor funcionalidad.
- También posee un intérprete de línea de comandos denominado Artisan que sirve de apoyo en las tareas de rutina (creación de componentes de código, trabajo con la base de datos, migraciones, rutas, cachés, tareas programadas, colas, entre otras) [4].

Se seleccionó un servidor privado virtual VPS, un servicio de alojamiento que emplea la virtualización como una forma de proporcionar recursos privados en un servidor multiusuario; principalmente porque la página web creada tiene un tráfico de nivel medio por lo que no fue posible utilizar un plan de hosting compartido, además no excede los recursos de un servidor dedicado. Por otro lado, estos VPS ofrecen planes de alojamiento acordes a diferentes necesidades, como el caso de GoDaddy, empresa que ofrece 4 planes para Linux, que permiten escalar el sitio sin problemas cuando sean necesarios más recursos, para el presente desarrollo se optó por el plan *económico* que comprende las siguientes especificaciones:

- Tipo de procesador: 2x Intel E5-2620v3
- Memoria caché del procesador: 15M de caché
- Memoria RAM 1 Gb
- Disco duro del procesador: 2x 600GB HDD

Adicionalmente, la Programación Orientada a Objetos OOP como paradigma de programación, para lo cual se usan objetos y sus interacciones para diseñar aplicaciones y programas de computadora. Está basado en varias técnicas, incluyendo herencia, modularidad, polimorfismo y encapsulamiento. Su uso se popularizó a principios de la década de 1990. Actualmente son muchos los lenguajes de programación que soportan la orientación a objetos, entre ellos se seleccionó PHP, de código abierto y adecuado para el desarrollo web, el cual puede ser incrustado en HTML, la principal característica es su extrema simplicidad lo que es una ventaja para el principiante, pero también ofrece muchas características avanzadas para los profesionales [5].

Los estándares utilizados para la creación de sistemas basados en web comprenden: seguridad para evitar el acceso sin autorización; internet para crear contenido con estructuras como las de HTML y XML; marcos de trabajo como entorno de aplicaciones dinámicas controladas por el usuario, lo que implica una gestión sólida y métodos de diseño comúnmente utilizados en los sistemas orientados a objetos, que permiten la configuración de diseño genérico para diferentes funcionalidades y proporcionar estética general. El uso y creación de plantillas facilita al marco de trabajo un esquema base de configuración del diseño para reutilizar dentro de la aplicación [6].

El uso de marco basadas en PHP para el desarrollo de aplicaciones web es frecuente porque ayudan a la productividad en relación al tiempo invertido a la realización de un proyecto [1], además tiene una curva de aprendizaje significativa para quien se inicia como desarrollador porque lo lleva a investigar, analizar y redactar documentos técnicos relacionados con la programación de páginas web.

La interfaz de desarrollo seleccionada fue *JetBrains PhpStorm*, ya que proporciona una arquitectura de aplicaciones fiable y flexible, con la cual el tiempo de desarrollo es considerablemente reducido, su uso es de pago, pero tiene licencia gratuita por un año para estudiantes de carreras de sistemas, provee prácticas de desarrollo sostenible y es una plataforma modular que sirve para crear aplicaciones más robustas y extensibles.

2.2 Diseño Del Sistema

2.2.1 Modelo relacional

El aplicativo Web está soportado en una base de datos diseñada en PostgreSQL, en la cual juegan un papel central los usuarios, ya que todos los procedimientos se realizan en torno a ellos; para esto se debe guardar su respectiva información iniciando con un código único (*id_titular*), el tipo de documento (*tipo_documento*), código del Programa Mas Familias en Acción (*codigo_titular*), tipo de acudiente 'mama', 'papa', 'abuelo', 'tío' (*id_tipoacudiente*), primer nombre (*primernombre*), segundo nombre (*segundonombre*), primer apellido (*primerapellido*), segundo apellido (*segundoapellido*), si es o no es líder del Programa (*lider_familias*), sexo (*sexo*), fecha de nacimiento, entre otros datos asociados a la identificación del proyecto.

El modelo relacional (Figura 2) para las bases de datos tiene un amplio uso en aplicaciones destinadas a programas sociales, por cuanto facilita la interconexión entre diferentes entidades lo cual permite almacenar y organización información de manera correcta, administrada a través de diferentes gestores entre ellos [7], PostgreSQL ([8], etc., con miras a contrarrestar las inyecciones SQL a las que se exponen las bases de datos.

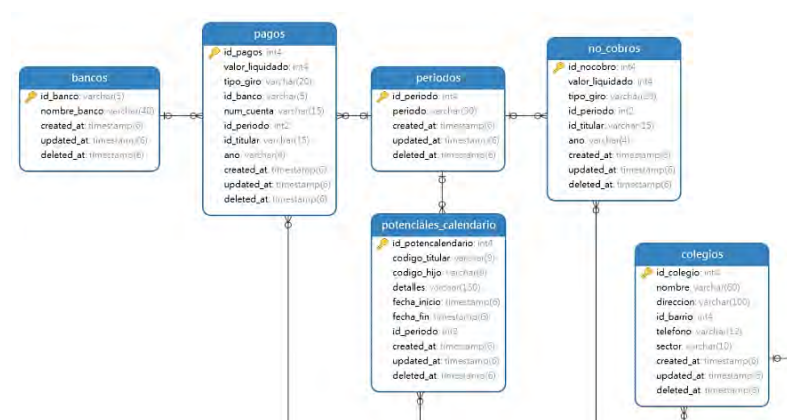


Figura 2. Modelo Relacional

2.2.2 Diagramas de casos de uso

Los casos de uso son las funcionalidades que puede realizar cada actor o tipo de usuario, en este caso, la aplicación Web cuenta con dos actores: el administrador y los usuarios. A continuación, se describen sus casos de uso diseñados.

- **Actor: Administrador.** El administrador tiene permisos para crear, eliminar, visualizar o modificar los roles ya existentes en la base de datos si accede a administrar. Para las categorías de los cónyuges el administrador podrá crear, listar o administrarlas por medio de la visualización, eliminación o modificación.

Necesita realizar una validación de usuario donde ingresa su email y contraseña que le permite el acceso a la aplicación Web con los permisos específicos de su rol. Una vez validado el ingreso al servidor de aplicación el administrador cuenta con el acceso a múltiples opciones dependiendo de lo que desee realizar, como registrar un usuario, listar los existentes, o administrarlos por medio de una modificación, eliminación o una visualización. Si lo que el administrador desea es gestionar los hijos, puede hacerlo mediante un formulario de creación para agregar nuevos a la base de datos, o con la manipulación de los ya existentes por medio de un eliminar, visualizar o modificar.

- *Actor: Usuario.* El usuario revisor que necesita acceder a la aplicación ingresa por medio del Login con un email y una contraseña (Figura 3). Una vez ingresado en la aplicación, el usuario tendrá acceso a toda la información del mismo, a la de sus hijos y al de su respectivo cónyuge de los cuales se podrá ingresar y modificar la información respectiva.

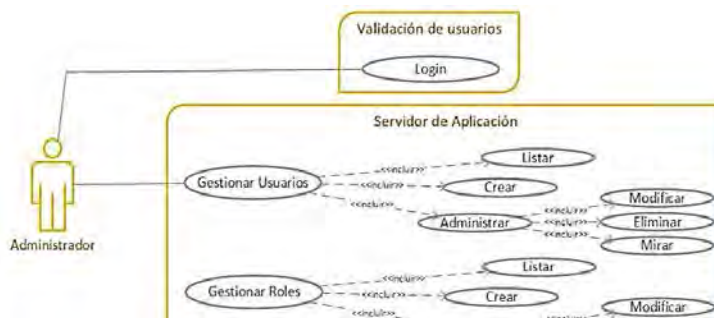


Figura 3. Diagrama Caso de Uso (Administrador)

2.2.3 Diagrama de clases

Un diagrama de clases está representado por una caja con tres subdivisiones en los que se registra el nombre de la clase, los atributos y las operaciones, la presentación puede ser esquemática o plegada, en donde solo se observa un contenedor rectangular con el nombre de la clase (Figura 4). En este diagrama se incluye también: clases, asociaciones, atributos, interfaces, operaciones y constantes, navegabilidad, métodos y dependencias. Sin embargo, no todas las clases presentes en el modelo conceptual aparecen en el diagrama de clases de diseño, solo se incluyen aquellas a las que se ha asignado algún tipo de responsabilidad en la interacción del sistema. Cabe resaltar que tanto el modelo conceptual como el diagrama de diseño tienen enfoques muy distintos, el primero en comprensión de un dominio, y el segundo en una solución software

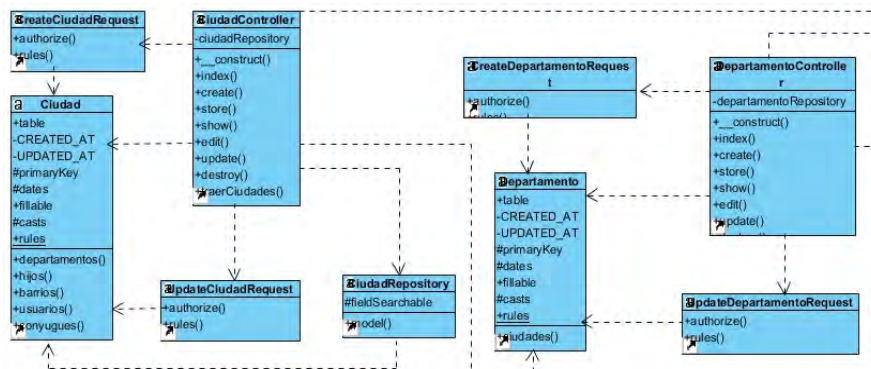


Figura 4. Diagrama de clases

2.3 Fase de desarrollo

El funcionamiento básico del patrón MVC puede resumirse en los siguientes:

- El usuario realiza una petición a través de la ruta
- La petición es capturada por el controlador
- El controlador llama al modelo correspondiente
- El modelo interactúa con la base de datos
- La información es enviada al controlador y este la envía a la vista
- Finalmente, la información se muestra en la vista

La aplicación Web cuenta con una distribución basada en el paradigma orientado a objetos basada en un proyecto Web desarrollado en el marco Laravel, con una estructura de carpetas y paquetes organizada usando el método de modelo, vista, controlador MVC y ruta como se observa en la Figura 5.



Figura 5. Diagrama MVC

2.3.1 Models

Las clases que trabajan con las consultas en bases de datos se denominan *Modelos*, por tanto, cada tabla tendrá una clase y cada registro un objeto, las consultas se realizarán a través de los métodos de las clases (Figura 6). Laravel trabaja con un Eloquent, ORM mediante el cual se realiza un mapeo de objetos y su posible relación, lo que facilita la consulta a través de los métodos preestablecidos que permitirán realizar tareas comunes como: insertar, recuperar registros por su id, modificar esos registros, listarlos, eliminarlos, entre otras [9].

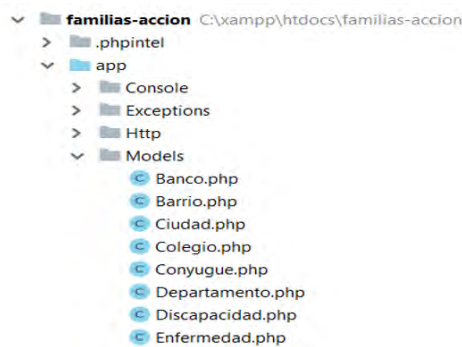


Figura 6. Modelos

2.3.2 Controllers

Un controlador es una clase con métodos que se comunican con los modelos para efectuar consultas a la base de datos y devolver respuestas al cliente a través de las vistas (Figura 7). Se puede tener un controlador para trabajar, por ejemplo, con historias clínicas, este comprende acciones que permiten insertar, modificar, eliminar o listar dicha información, incluso una acción que permite visualizar en pantalla los últimos 10 registros insertados, los cuales se guardan en una variable, gracias a un método de un modelo que presenta la tabla de historias clínicas y la envía a una vista, que muestra esos registros con código HTML [9].



Figura 7. Controllers

2.3.3 Views

Es el producto final de una petición, el código HTML que se le devuelve al cliente, aquí no debería haber ninguna lógica, sin embargo, puede contener impresiones de variables, condicionales o bucles; pero no más que eso. La vista (Figura 8) tiene un fin: entregar el código HTML de respuesta [9]. También se puede decir que la vista Presenta el 'modelo' y los datos preparados por el controlador al usuario de forma visual. El usuario podrá interactuar con la vista y realizar otras peticiones que se enviarán al controlador [4].

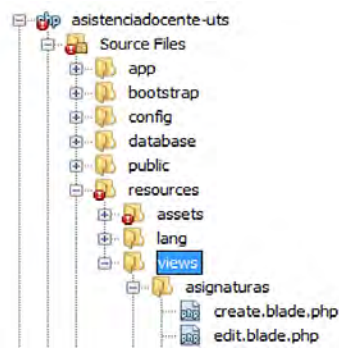


Figura 3. Views

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El desarrollo y cumplimiento de los objetivos general y específicos, permitieron obtener como resultado un sitio web que prestara un servicio eficiente, rápido, con una interfaz sencilla y que le diera al administrador un control total sobre el sistema creado, teniendo en cuenta los requisitos generales y de funcionalidad y se agregaron funcionalidades que iban apareciendo en el desarrollo. La figura 9, evidencia el resultado obtenido como cumplimiento del objetivo general.



Figura 4. Página de inicio

La página principal del programa familias en acción cuenta con menús desplegables, características y funciones que hacen de esta un sitio web pensado en la accesibilidad para todo tipo de usuarios (Figura 10).



Figura 5. Página de informacional del programa MFA

Como resultados de la fase de diseño, se evidencia la generación del modelo relacional, con el cual se lleva a cabo el almacenamiento de datos por medio del motor de base de datos Postgres; de igual manera, en esta fase se obtiene los diagramas de caso de uso y los diagramas de clase que permite observar cómo se llevó a cabo la inclusión de cada uno de los requisitos funcionales y no funcionales de la primera fase y que se observan en párrafos anteriores. Así mismo en esta fase se realiza la maquetación del sitio web, como se observa en la Figura 11.

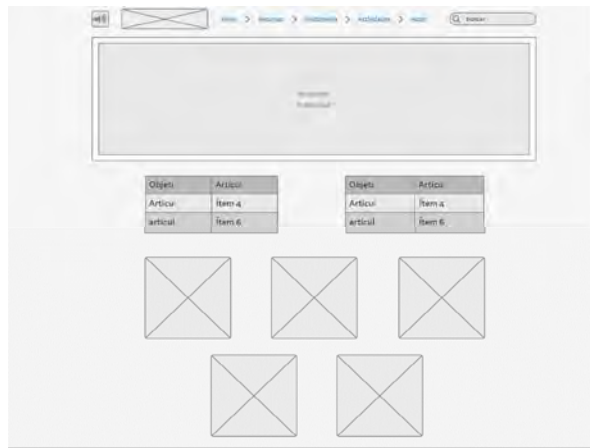


Figura 11. Maquetación del sitio

El resultado de la fase de desarrollo se evidencia con las líneas de código realizadas para generar la interfaz de usuario que se evidenció en el cumplimiento del objetivo general y lo observado en la Figura 12.

```

Información de CSS válida
@charset "UTF-8";

@font-face {
  font-family: "Open Sans";
  font-style: normal;
  font-weight: 300;
  src: local('Open Sans Light'), local('OpenSans-Light'), url(http://fonts.gstatic.com/s/opensans/v15/mem5YaGs
```

Figura 12. Líneas de código

En cuanto a las pruebas de código CSS3 y HTML5 se realizaron para verificar la calidad del código fuente con el fin de implementar las mejores prácticas de desarrollo definidas por la organización internacional [10]según estándares para este tipo de aplicaciones o sitios web. Esta herramienta permite hacer pruebas respecto a la resolución teniendo en cuenta que el cambio de dispositivo un cambio de esta, una presentación de una pantalla vertical a una posición horizontal por lo que se genera una distribución de los elementos que comprenden el sitio, así permite visualizar errores en ellos derivados por el uso [11].

Las herramientas utilizadas para la realización de las pruebas de forma online se encuentran sugeridas dentro del documento Lineamientos y metodologías en Usabilidad para Gobierno en Línea GEL, hoy Gobierno Digital, teniendo cada una de las directrices establecidas para su revisión (Figura 13).



Figura 6. Pruebas de código

Diferentes pruebas se realizan para revisar la estabilidad del sitio web, por medio de pruebas de rendimiento que evidencian el acceso y la estabilidad de la página como se observa en la Figura 14

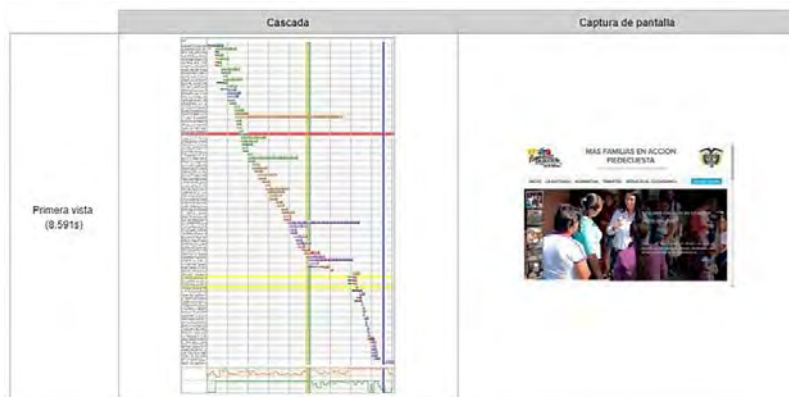


Figura 14. Prueba de rendimiento

Las pruebas de calidad hacen referencia a la usabilidad, arquitectura del sitio, uso de etiquetas SEO, entre otros aspectos relevantes, requeridos de acuerdo con los lineamientos del Gobierno en Línea GEL, hoy Gobierno Digital. El primero de ellos comprende la maquetación o desarrollo del aplicativo en baja resolución, tal como se muestra en las Figuras 15 y 16.



Figura 15. Pruebas de calidad: usabilidad y accesibilidad

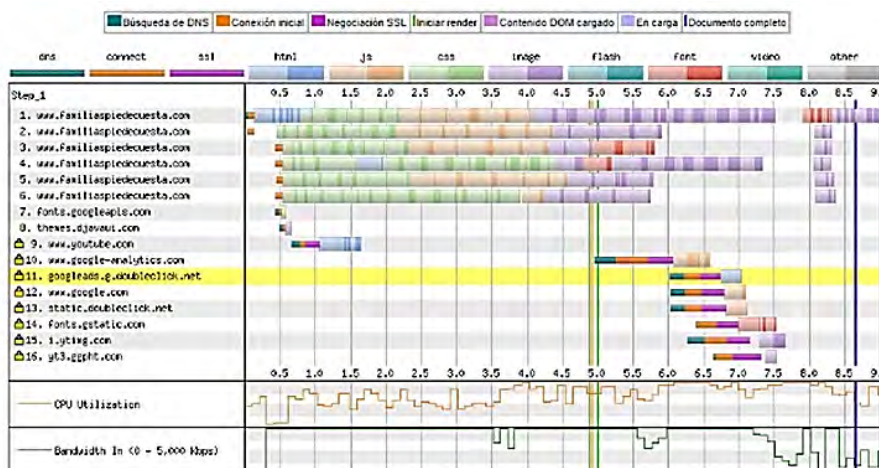


Figura 6. Prueba de rendimiento según contenido y conexión

De acuerdo con los resultados obtenidos en las diferentes herramientas aplicadas se efectuaron los cambios correspondientes al uso de estándares establecidos para este tipo de sitios (aplicación web). Otros tipos de pruebas que se realizan son las unitarias a fin de verificar su funcionamiento y eficiencia del código, por otro lado, pruebas de caja negra, de carga y estrés sirven para verificar su funcionalidad y rendimiento [12].

4. CONCLUSIONES

Como resultado final, se obtiene una interfaz amigable con los usuarios, comprensible para esta población dado que es de conocimiento público que la mayoría de las personas que ingresan a la aplicación Web son

población vulnerable y del Sisbén 1 y 2 con estudios básicos. Otro de los focos al momento del desarrollo fue la de agilizar las tareas del administrador no solo con el manejo de registros sino también con un sistema de asignación de roles, actualización de datos y auditoría fácil y ágil. Los errores detectados se corrigieron finalmente, dando lugar a un sitio accesible y de fácil comprensión en el manejo para el usuario.

El diseño inicial: casos de uso, diagramas de secuencia y modelo relacional, se realizó conforme con los requisitos generales del cliente directo, sin embargo, este se fue ajustando de acuerdo con las condiciones que se fueron encontrando en la medida del desarrollo, pero siempre buscando mantener la base del diseño preliminar.

Una buena elaboración del modelo relacional no solo permite la creación de una base de datos óptima, sino que facilita el desarrollo de la aplicación, ya que teniendo claro cada una de las tablas y su relación se hace más comprensible lo que se desea funcionalmente de la aplicación, optimizando el software.

Con base en la información recopilada se diseñó el modelo de la base de datos, que se implementa en el administrador de base de datos PostgreSQL, garantizando un proceso limpio a la entrada y salida de datos.

El diseño de la aplicación web se realizó a través de una de las opciones de plantilla que ofrece el marco Laravel, lo cual permitió un desarrollo más dinámico conforme al diseño, ya que facilitó la integración de las funcionalidades, a través del modelo-vista-controlador y rutas porque admite reutilizar, modificar y hacer mantenimiento de código de manera óptima y así mismo cuenta con ventajas en términos de eficiencia, eficacia, usabilidad, accesibilidad y seguridad del sitio. La distribución por capas del marco permite un trabajo ordenado y organizado que facilita su escalabilidad e intervención para las mejoras futuras a la aplicación. Así mismo, se tuvo en cuenta el lenguaje utilizado por las familias beneficiarias del programa MFA de Piedecuesta, que es relativamente sencillo, básico y comprensible acorde a su nivel educativo

Se desarrolló la aplicación familias-acción, teniendo en cuenta la información sintetizada mediante la identificación de los requisitos de funcionalidad de la aplicación web; esta, se realizó a través de la recopilación de información en encuestas llevadas a cabo con la población objetivo, lo que permitió conocer problemáticas en la calidad de la atención. Con lo anterior, el modelo de base de datos diseñado, y trabajando con los formatos del Programa Más Familias en Acción, se ajustó el Marco LARAVEL 5.5.4, y se crearon los métodos para la validación de los usuarios, realizando las consultas en base a información real del Programa, para certificar que todos los usuarios y beneficiarios ingresados pertenecen al mismo.

El desarrollo de una aplicación para la atención virtual de las familias beneficiarias del Programa Más Familias en Acción, del Municipio de Piedecuesta, satisface las necesidades detectadas y permite realizar un proceso transparente y eficaz al momento de tener el control de la información de los beneficiarios del programa, realizando una lista de chequeo para verificar los requisitos exigidos por usuarios y administrador del programa, y de acuerdo con lo establecido en la estrategia Gobierno en Línea (GEL), hoy Gobierno Digital para el caso de las aplicaciones web.

Finalmente pude cumplir con los objetivos propuestos diseñando una aplicación de fácil manejo, que le proporciona al Programa Más Familias en Acción, del Municipio de Piedecuesta, no solo un mejoramiento de los servicios con los que ya contaba sino también la adaptación de los nuevos servicios para el control de un sistema de registro de usuarios completo, rápido y seguro. Al investigar el proceso de verificación de compromisos y el registro que se llevaba de los mismos, se pudo establecer que se realizaba un registro poco confiable por parte de los funcionarios del programa, pudiendo así alterarse en cualquier momento dichos reportes, pues la fiabilidad dependía de las personas que lo realizaban.

Después de realizadas las pruebas se encontró que el prototipo cumple a conformidad con los objetivos planteados, sin embargo, se pueden hacer mejoras o ajustes para integrar nuevas funcionalidades en una siguiente versión:

- Para una próxima versión la implementación de las imágenes en la que el usuario pueda agregar su foto, la de sus hijos y cónyuge.

- Se recomienda para una próxima versión, mejorar la interfaz, agregando diferentes tipos de animaciones que hagan más amigables el sistema.
- Así mismo, en la aplicación Web tener una opción para recordar contraseña que se realice por medio del email registrado en la base de datos.
- Realizar verificaciones periódicas a la aplicación para comprobar su funcionalidad en el entorno real y así definir el ajuste de los módulos y la integración de nuevas funcionalidades para una nueva versión como por ejemplo las especificaciones del servidor que posiblemente se deban ampliar para un mejor rendimiento.
- Se sugiere la integración de nuevos actores tales como coordinadores y digitadores con el fin realizar directamente otros procesos.
- Realizar una actualización que permita integrar la lectura biométrica para la autenticación de los funcionarios en el control de ingreso.

REFERENCIAS

- [1] Herrera J. y Veliz A. (2020). Desarrollo de una Aplicación Web para la mejora de procesos del Área de Atención Integral del Niño en el Centro de Salud José Leonardo Ortiz, distrito de José Leonardo Ortiz, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque. Perú.
- [2] Molina J. et al. (2018). Comparación de metodologías en aplicaciones web. 3C Tecnología: Glosas de innovación aplicadas a la pyme. 3Ciencias 7(1).
- [3] Cisneros E. (2021). Aplicación web para reporte y seguimiento de denuncias en el GAD Municipal de Salinas mediante la implementación de un chatbot multilenguaje como asistente virtual. Press.
- [4] Gallego A. (2016). Introducción a Laravel 5. UGFR.
- [5] The PHP Group. (2016). PHP. USA.
- [6] Senn J. (1992), Análisis y diseño de sistemas de información. McGraw-Hill.
- [7] Alvear R. y Castillo M. (2021). Desarrollo de una aplicación Web de automatización de proceso en atención al cliente con tecnología de inteligencia artificial conversacional en Juls Store. Press.
- [8] Mena O. (2020). Técnicas de seguridad informática para reducir las vulnerabilidades por inyección SQL en aplicaciones web. JUHGF.
- [9] Gaitan F. (2016). Laravel, parte 3: Modelo Vista Controlador. Recuperado: <http://fernando-gaitan.com.ar/laravel-parte-3-modelo-vista-controlador/>
- [10] W3C. (2018). W3C Markup Validation Service. Recuperado: <https://validator.w3.org/>
- [11] Guardiola V. (2017). Diseño e implementación de una aplicación web para la gestión integrada de redes. Press.
- [12] Fernández E. (2020). Aplicación Web para el apoyo a la gestión de la información del Programa de Atención Materno Infantil en el municipio de Los Arabos. FuFDS.

Impacto de la implementación de una plataforma como servicio para apoyar procesos de Formación empresarial mediante la modalidad MOOC

José de los Santos Solórzano Suárez¹

Sandra Milena García Córdoba²

Doris Constanza Alvarado Mariño³

Raúl Bareño Gutiérrez⁴

Jhonatan Paolo Tovar Soto⁵

¹⁻⁴Fundación Universitaria Compensar

⁵Universidad San Buenaventura

Colombia

Los Massive Open Online Courses MOOC han incursionado en los diferentes sectores productivos a un ritmo vertiginoso, ofreciendo cursos formativos diseñados y orientados a la formación empresarial. En esta investigación se analiza el impacto de la implementación de una plataforma como servicio para apoyar procesos de Formación empresarial mediante la modalidad MOOC, para la gestión de la productividad y el mejoramiento continuo en las empresas de Bogotá, Colombia. Los participantes fueron talento humano de nivel operativo. Dentro de la metodología utilizada se presentan los elementos para el diagnóstico y evaluación de los aprendizajes adquiridos durante el proceso, donde una de las estrategias principales para la implementación fue la selección de grupos focales y elementos de gamificación para llamar la atención de los participantes. Los resultados muestran algunas ventajas que se pueden obtener al matricularse en MOOC que integran herramientas innovadoras en su diseño mediadas por servicios en la nube, y el impacto colateral en el desarrollo de habilidades y destrezas digitales como autoaprendizaje, aprendizaje colaborativo y desarrollo de capacidades informáticas e informacionales. En general se recomienda orientar acciones para profundizar sobre el nivel de conocimiento que explica la deficiencia de los MOOC, a la vez que se identifican acciones claves para ampliar la implementación de estos cursos a las empresas.

¹ Ingeniero de Sistemas y Magíster en Tecnología Educativa.

Contacto: jhosepsolorzano@gmail.com

² Ingeniero de Sistemas, Especialista en Auditoría de Sistemas de Información y Magíster en Evaluación y aseguramiento de la calidad de la educación.

Contacto: samy1116@gmail.com

³ Ingeniero de Sistemas y Magíster en Educación.

Contacto: amconstanza@yahoo.com

⁴ Ingeniero de Sistemas y Magíster en Telemática.

Contacto: raulbare@yahoo.es

⁵ Ingeniero electrónico y Magíster en Automatización Industrial.

Contacto: jptovars@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los cursos MOOC tienen una historia reciente. Sus inicios datan del año 2008 donde comenzó el primer curso que adoptó esta denominación, por lo que se encuentra en pleno desarrollo y ha ido de la mano con la evolución de las prácticas educativas orientadas al aprendizaje a distancia y de autonomía por parte del estudiante. Los cursos MOOC pueden considerarse una derivación de experiencias en el área de la educación abierta, en línea, y especialmente, del movimiento de recursos abiertos (*open education resources*) en el campo de la educación a distancia.

En la actualidad, son múltiples las plataformas para la implementación de estos cursos a nivel mundial, tales como: Coursera, Udacity, Canvas, Udemy, EdX, eLearn iversity (en Alemania, MiríadaX, FUN, XuetangX, OpenUpEd y TelevisionEducativa [1]).

En Colombia existen universidades que han implementado cursos MOOC o generado material para las plataformas mencionadas. En el caso de la plataforma de Miríada X se encuentran la Universidad Tecnológica de Pereira, la Universidad de Ibagué y la Corporación Universitaria Minuto de Dios, por el lado de Coursera solo se encuentra la Universidad de los Andes. El total de cursos bajo la modalidad de MOOC ofrecidos por dichas universidades es de 14, siendo el campo de la ingeniería el que más cursos y contenido presenta [2].

La Organización ubicada en la ciudad de Bogotá inició sus labores como institución de carácter técnico. Desde su creación estuvo orientada a facilitar el ingreso a aquellas poblaciones en la educación superior, con condiciones socioeconómicas complicadas, es decir, de bajos recursos.

La labor realizada por la Organización ha sido reconocida desde el ámbito nacional como internacional, tanto por la comunidad académica y científica como por el sector productivo, económico y social. Lo anterior va acorde con la misión y visión, enfocadas la formación integral mediante ejercicios permanente de fortalecimiento de competencias digitales, a través de metodologías presenciales y virtuales, para ser reconocida como empresas con visión hacia una transformación digital comprometidas con el desarrollo humano integral y sustentable del país.

En consecuencia, con el auge de las nuevas tecnologías de la información y comunicación, el foco de atención se encuentra en procesos con tecnologías emergentes acorde a la era digital. Por tanto, es importante para la organización gestionar el desarrollo de estrategias o iniciativas que coadyuven a generar espacios para construir el conocimiento de manera colaborativa. A su vez, que su participación se constituya en una verdadera alternativa para el acceso a formación continua y certificable en todas las áreas de conocimiento que se manejen mediante los cursos ofrecidos [3].

Lo anterior debido a que desde los últimos 10 años las organizaciones han implementado diversas herramientas a las que no han dado continuidad, siendo uno de los factores principales el no seguimiento y mantenimiento de estas. Se resalta el caso de la implementación de MOODLE como aula de apoyo a la presencialidad, utilizada para administrar cursos virtuales, exámenes y almacenamiento de información. No obstante, su contenido era plano y no se pudo tener estadísticas del desempeño en la formación [4].

Así entonces, el actual trabajador debe ser capaz de construir activa y autónomamente su propio conocimiento, por tanto, debe controlar su ritmo de aprendizaje [5], pues en este momento no solo se da importancia al lugar donde se aprende sino también al enfoque que elige para profundizar sus conocimientos, esto demarca en cómo se aprende.

De manera tradicional, las organizaciones adoptan procesos de formación en modalidad presencial, impidiendo alternativas en los educandos para el desarrollo del trabajo autónomo debido a la carencia de espacios de tutoría o clases de profundización guiadas por un facilitador. De igual manera, no logra en la mayoría de las situaciones completar de manera individual los saberes establecidos, debido a que las dudas que se generan muy difícilmente pueden ser resueltas, conllevando a la desmotivación y desinterés por la obtención de los logros [6].

En consecuencia, desde las empresas se han abonado esfuerzos para la construcción de una infraestructura que pueda soportar la inmersión en tecnologías emergentes y la adaptación a los cambios en esta era digital [7]. Del mismo modo, se ha desarrollado una plataforma enmarcada en servicios de computación en la nube, que se destacan en ambientes de accesibilidad, escalabilidad, interoperabilidad, de alta disponibilidad y orientados a las necesidades de los usuarios, adaptables a los condiciones técnicas y funcionales.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 MOOC

La metodología educativa basada en el uso de las nuevas tecnologías de la información, con el fin de ofrecer a un gran número de usuarios la posibilidad de adquirir conocimientos o desarrollar competencias sobre un tema en particular es conocido como MOOC. Para comprender de mejor forma este concepto, a continuación, se encuentran algunas definiciones de autores:

Los Cursos Masivos Abiertos en Línea son clases impartidas a mediante plataformas tecnológicas que facilitan el proceso de enseñanza-aprendizaje a miles de estudiantes y profesores [10]. Estos MOOC pueden ser clasificados en tres grupos principales: los que se basan en la red de aprendizaje, aquellos basados en las tareas a desarrollar y los basados en el contenido [11].

Surgieron como respuesta a los retos que enfrentan instituciones educativas y organizaciones en tiempos de sobrecarga de información: debido a que existe una necesidad de capacitación de la población que busca educación de calidad a bajo costo [12].

La integración de las tecnologías de la información y Comunicación – TIC, ha sido un tema de discusión por mucho tiempo, siendo uno de los espacios de discusión las Instituciones de educación superior (IES).

Dentro de las premisas que han sido tema de debate, se encuentra la pertinencia, con respecto al cómo hacer que estas tecnologías agreguen valor a lo que se puede hacer sin la utilización de las mismas, pensando claramente en enriquecer, complementar y flexibilizar buenas prácticas de la educación presencial, apoyadas en la mayoría de los casos, de múltiples medios no necesariamente tecnológicos [13].

Con lo anterior, en cualquiera de los escenarios, donde la inclusión de actividades de aprendizaje que hacen uso de TIC, siendo tales actividades presenciales, semipresenciales o a distancia., el profesor sigue siendo un elemento fundamental, como organizador y orientador de procesos de aprendizaje bajo un modelo constructivista-conexionista y autorregulado, siendo también un orquestador de los recursos educativos que su institución y el ciberespacio ponen a disposición de los aprendices [14].

Existen múltiples razones para abordar la problemática de mejoramiento de procesos de diversa índole en las organizaciones con apoyo de Tecnologías de la información y comunicación, como, por ejemplo: establecer compromisos con estrategias que permitan aumentar la calidad y cobertura de la educación superior, donde exista una flexibilización de entornos de aprendizaje, superando barreras espaciotemporales y logrando accesibilidad a recursos educativos de buena calidad, etc.

Cada una de estas estrategias son perspectivas fundamentales, por tanto y por lo retador que puede ser la toma de decisiones sobre la maximización en el uso educativo de los recursos tecnológicos dentro de las empresas, siendo el b-Learning y el e-Learning, dos modalidades que pueden complementar la educación presencial y sobre las cuales existen muchos elementos que aprender.

2.2 Modalidad e-learning y b-learning.

Los cambios de las metodologías en el aula se relacionan directamente, en la mayoría de los casos de Internet y de las herramientas de la Web 2.0 y 3.0. De igual forma, con el desarrollo de una perspectiva, constructivista, bajo las modalidades E-Learning y B-Learning, entiendo la primera, en concordancia con [17], quien define al e-Learning como:

Capacitación no presencial que, a través de plataformas tecnológicas, posibilita y flexibiliza el acceso y el tiempo en el proceso de enseñanza-aprendizaje, adecuándolos a las habilidades, necesidades y disponibilidades de cada discente, además de garantizar ambientes de aprendizaje colaborativos mediante el uso de herramientas de comunicación síncrona y asíncrona, potenciando en suma el proceso de gestión basado en competencias.

Así mismo, el B-Learning define que el formador asume de nuevo su rol tradicional, pero usa en beneficio propio el material didáctico que la informática e Internet le proporcionan, para ejercer su labor en dos frentes: como tutor on-line (tutorías a distancia) y como educador tradicional (cursos presenciales). La forma en que combine ambas estrategias depende de las necesidades específicas de ese curso, dotando así a la formación online de una gran flexibilidad [16].

Lo anterior da a suponer que la formación de los estudiantes de educación superior puede ser nutrida mediante diferentes estrategias y recursos tecnológicos, debido a que permite potenciar la búsqueda y difusión de la información, así como el logro de una meta común. En este sentido, el nacimiento de los MOOC es sin duda un hito en la educación del siglo XXI y claramente una revolución en el modelo de formación continua [17].

3. MÉTODO

Con enfoque mixto, esta investigación caso de estudio toma como muestra de análisis una población conformada por un grupo de 27 trabajadores que ocupan cargos operativos entre tres y cinco años, evaluados de manera periódica de acuerdo con su desempeño en el marco de los diversos procedimientos o mecanismos existentes en la organización. La investigación propone evaluar factores (trabajo grupal, aporte de ideas y comprensión del mundo digital), que influyen de forma dependiente e independiente en el desempeño individual-colaborativo y la productividad en cuanto al cumplimiento de los objetivos establecidos a partir de competencias digitales.

En primera instancia, se identifica en las organizaciones los trabajadores de acuerdo con información del área de talento humano en relación con el nivel de desempeño y las condiciones laborales. Con lo anterior, el área correspondiente define estrategias como la creación de un espacio virtual, en modalidad b-learning y con características Cloud Computing CC.

Los factores que inciden en el desempeño, tomando como base dos elementos fundamentales: 1) Evaluación periódica de desempeño del nivel operativo generada por el área de talento humano, y 2) un examen diagnóstico clasificados en categorías (componentes) de las temáticas establecidas en el nivel básico de competencias digitales y su correlación con herramientas digitales según Pearson, en el contexto de las organizaciones, definidas y orientadas entre otras, Gestión de la información, trabajo Colaborativo Virtual, liderazgo, resolución de problemas, Ofimática, Comunicación Digital, Seguridad Digital, Salud y Bienestar Digital y lectura digital.

La segunda fase, a raíz de las dificultades detectadas con los factores de incidencia se propone el desarrollo de una plataforma MOOC que permita dar solución a la problemática identificada. La tercera fase, consiste en implementar la herramienta y evaluar los resultados. De acuerdo con la naturaleza del estudio, en cada fase se analizarán los datos necesarios para su desarrollo, desde lo teórico, metodológico y resultados. Esto es observación directa, técnicas de investigación documental, entrevistas y cuestionarios focalizados.

En cuanto a las herramientas utilizadas para el diagnóstico, se tuvo en cuenta lo siguiente escala valorativa (Tabla 1) para la medición del nivel de desempeño de los trabajadores.

Tabla 1. Escala de valoración de desempeño

Nivel académico	Escala
Bajo	0 hasta 3.4
Básico	3.5 hasta 4.4
Alto	4.5 hasta 5.0

La aplicación de la prueba diagnóstica consiste en un total de 10 ítems desde el marco denominado juicio situacional, para la medición de competencias básicas digitales, elaboradas por especialistas externos conformado por tres profesionales del área específica. Esta prueba para un solo intento por trabajador se parametrizó con una duración de dos horas, en un rango de tres días con el fin de abarcar la población muestra.

Es fundamental resaltar que los MOOC se han presentado como toda una revolución que plantea alternativas socio-constructivistas y conectivistas para la educación y la formación, que busca aprovechar al máximo las ventajas que ofrecen las nuevas tecnologías. En general un MOOC, permite a un usuario de manera autónoma y ubicua acceder a contenidos de formación y con elementos de gamificación que motiven un proceso de autoaprendizaje, resolviendo en un solo escenario disponibilidad de horas del facilitador, tiempos del usuario en horario no laborales, personal especializado, problemas de movilidad, entre otros. Con el MOOC se pretende eliminar las barreras físicas, motivar a la continua formación, sin postergaciones, con contenidos de calidad y con ello cumplir con los planes de desarrollo profesional [8].

Por su parte, para las Organizaciones significa hacer parte de la transformación digital, promoviendo al interior una cultura digital y un posicionamiento en los nuevos retos del siglo XXI. De manera obligatoria éstas buscan alinear sus procesos de negocio con las Tecnologías de la Información TI desde la gestión de la misma, lo que significaría un equilibrio entre una arquitectura empresarial, la capacidad de respuesta de soluciones hacia necesidades de sus clientes - usuarios, y una respuesta de sus empleados en virtud de los indicadores de gestión [9].

4. RESULTADOS

Una vez aplicado los instrumentos de recolección de la información, se procedió a realizar el tratamiento correspondiente para el análisis de los mismos, el diseño y desarrollo de la aplicación, así como las pruebas pertinentes. Por cuanto la información presentada a continuación indica en detalle la implementación de la plataforma MOOC y los resultados a los que se llega con la investigación.

En primera instancia, el desarrollo de la plataforma MOOC se realizó durante un periodo de tres meses, donde se tuvo en cuenta los resultados de desempeño laboral indicados en el informe de talento humano. Con estos resultados y también, teniendo en cuenta las conclusiones del otro instrumento utilizado (examen diagnóstico), se dió paso a crear una plataforma con cursos de profundización en aquellas temáticas concernientes a las competencias digitales básicas, según lo mostrado por estos instrumentos, dificultaban en el proceso de desarrollo profesional del talento humano de nivel operativo y como tal la disminución en la productividad.

En la Figura 1 se muestra la plataforma con algunos apartados de los recursos que se adicionaron y los cursos que se encuentran a disposición del talento humano de nivel operativo.



Figura 1. Fase de desarrollo de la plataforma SMOOC

4.1 Aplicación de los instrumentos

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en la aplicación del primer instrumento (Examen diagnóstico), entregado por el área de talento humano.

Tabla 2. Resultados de revisión documental planilla desempeño

Nivel desempeño	Total
Básico (0 - 3.4)	14
Medio (3.5 - 4.4)	11
Alto (4.5 - 5.0)	2

En la tabla anterior se puede observar, según la escala de valoraciones, que el 51% de los participantes presentan en el informe de talento humano un nivel de desempeño básico. De acuerdo con estos resultados, se decide realizar el diseño e implementación del MOOC.

De acuerdo con lo indicado en la Tabla 3, se presenta un significativo número de respuestas incorrectas en cuanto los componentes denominados gestión de la información, comunicación digital, ofimática y seguridad digital, con una tendencia de 32% del total de ítems-preguntas presentados.

Tabla 3. Resultados de la aplicación de salida del instrumento 2

Componente	Nivel de clase																										
	Incorrecto	Correcto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Servicio Digital	6	20	I	C	I	C	I	I	I	C	I	I	I	C	I	I	I	C	C	I	I	I	I	I	I	I	I
Gestión de la Información	10	16	I	I	C	C	I	I	I	C	C	I	C	C	I	I	I	I	I	C	I	C	C	I	I	I	I
Trabajo Colaborativo Virtual	6	20	I	I	C	I	I	I	I	C	C	I	C	I	C	I	I	I	I	I	C	I	I	I	I	I	I
Liderazgo	8	18	C	C	I	I	C	C	C	C	C	C	I	C	C	I	C	I	C	C	I	C	C	C	I	I	C
Resolución de problemas	8	18	C	C	C	I	C	C	I	C	I	C	C	I	C	C	I	C	C	C	I	C	I	C	C	I	C
Ofimática	9	17	I	I	C	C	I	I	I	I	I	C	C	I	C	C	I	C	I	C	I	I	I	I	I	I	C
Comunicación Digital	9	17	I	C	I	C	I	I	I	I	I	I	C	I	C	I	I	C	C	C	I	C	I	I	I	I	C
Seguridad Digital	8	18	C	I	I	C	I	C	I	I	C	I	C	I	I	I	I	C	I	C	I	I	I	I	I	I	C
Salud y Bienestar Digital	7	19	I	I	C	I	I	I	I	I	C	C	C	C	I	I	I	C	I	I	I	I	I	I	C	I	I
Lectura Digital	6	20	I	C	I	I	C	I	I	I	C	I	I	C	I	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C
Total	77	183																									
Porcentaje	30%	70%																									

Nota: C= Correcto, I= Incorrecto

En consecuencia, se evidencia una cantidad alta de respuestas correctas, con una tendencia de respuestas acertadas en los componentes trabajo colaborativa virtual, servicio digital, presentando en promedio el 75% del total de respuestas.

Para todos los componentes los ítems-preguntas, el total de desaciertos representa un porcentaje de solo un 30% (77 respuestas incorrectas), siendo una cifra positiva, debido a que el 70% (183) del talento humano de nivel operativo tuvieron acierto sobre el total de las respuestas.

Los anteriores resultados pueden tener causa en la falta de espacios para la profundización de las temáticas.

4.2 Resultados comparativos entre la aplicación de inicio y de salida del instrumento 1

En la Tabla 4 se presenta el análisis comparativo entre los resultados iniciales al aplicar el instrumento de diagnóstico en el talento humano de nivel operativo y los resultados posteriores al uso del MOOC.

Tabla 4. Resultados de diagnóstico y salida (Post-MOOC) aplicada al talento humano

	Diagnóstico inicial		Resultado	Diferencia
	Escala Nivel de desempeño	Escala Nivel de Desempeño	Escala Nivel de Desempeño	
Participante 1	1,8		3,9	2,1
Participante 2	3,8		4,1	0,3
Participante 3	3,5		4,2	0,7
Participante 4	4		4,5	0,5
Participante 5	2,8		4,4	1,6
Participante 6	0		2,7	-2,7
Participante 7	0		0	0
Participante 8	5		4,4	-0,6
Participante 9	3,5		4,4	0,9
Participante 10	2,7		4,2	1,5
Participante 11	4		0	-4
Participante 12	4,5		4,5	0
Participante 13	4,3		3,8	-0,5
Participante 14	4		4,3	0,3
Participante 15	1		2,5	1,5
Participante 16	4		4,3	0,3
Participante 17	3,5		4,3	0,8
Participante 18	4		4,4	0,4
Participante 19	3,3		4,3	1
Participante 20	2,5		2,4	-0,1
Participante 21	2,8		4,3	1,5
Participante 22	3,3		4,5	1,2
Participante 23	2,5		4,5	2
Participante 24	0		4,4	4,4
Participante 25	3,3		4,1	0,8
Participante 26	4		3,9	0,1
Promedio	3		3,7	0,7

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla anterior, se evidenció una variación importante en el desempeño para los participantes que utilizaron la estrategia MOOC. Estos, en sus resultados finales aumentaron de manera considerable su evaluación, con promedio inicial de 3,0 del grupo en general, ubicados en el *nivel bajo*, en la escala de evaluación a un promedio de 3,7, siendo el *nivel básico*.

Por su parte cuatro participantes de nivel operativo (15%) alcanzaron el *nivel alto*, cuyo nivel no fue alcanzado en el diagnóstico. Del mismo modo, 17 de los participantes de nivel operativo (65%) del grupo alcanzaron un *nivel básico* de desempeño, que incluyen competencias fundamentales desde los componentes establecidos. Finalmente, solo 5 participantes (20%) se encuentran en un *nivel bajo*, aunque se debe destacar que dos de los participantes se retiraron por motivos económicos, por tanto, solo tres (11%), se encuentran en el nivel bajo. En consecuencia, la aplicación de una plataforma MOOC da respuesta a la necesidad, en los resultados se destaca una mejora de aprendizaje incremento en el nivel de desempeño de la población participante.

El problema objeto de esta investigación radicaba en la afectación del desempeño laboral de nivel operativo, en razón de las competencias digitales, establecidas en función de los componentes descriptores de las mismas.

Por tanto, se evidenció las bondades de un recurso que permitiera centralizar los materiales de estudio, el fortalecimiento de la autonomía en la formación que medie con contenidos de acuerdo con las temáticas propias del contexto laboral en las organizaciones, permitiendo un aumento visible y significativo en los resultados obtenidos.

5. DISCUSIÓN

El mundo digital, sus operaciones, procesos y escenarios en las organizaciones es un reto, en cuanto la transición hacia una transformación digital. La computación en la nube es uno de los recursos, herramienta de hacerle frente a este reto, para la definición de un portafolio de servicios TI [18].

Uno de los escenarios fundamentales es el de las capacidades de los equipos impulsando el cambio en éstas. Definir una hoja De Ruta para la migración en la nube, es una acción que nace en un plan estratégico y que se dinamiza en los dominios de la comunicación y la participación de todos los actores que adelanten y participen en el alineamiento de sus procesos de negocio y la gestión TI, sin dejar de lado, la necesidad de hacer realimentación permanente de aprendizaje y construcción de espacios que procuren por la convergencia de actores y definiciones de ejecución [19].

Desde un análisis coyuntural, el proyecto surge a partir de una necesidad que, si bien es cierto, data de hace varios años, presenta de manera amplia un de aplicación desde la creación de plataformas para profundizar o reforzar los conocimientos en las organizaciones, en cuanto el talento humano su gestión, la generación de conocimiento son fundamentales en el crecimiento y desarrollo de sus procesos.

Con la implementación de la plataforma MOOC, se dio un giro a la estrategia que tradicionalmente utilizada para solucionar una problemática organizacional en cuanto los planes de formación y las contribuciones a desempeño laboral y su carrera de desarrollo profesional. la aceptación por parte del área de talento humano, la motivación de los trabajadores de nivel operativo, en tomar los cursos de refuerzo, dieron pie para entender que se iba por buen camino.

A continuación, se detallan algunas fortalezas detectadas en el desarrollo de este trabajo:

- La implementación de la plataforma ofrece contenido de alta calidad, de forma gratuita y con la accesibilidad a cualquier educando/participante.
- Los cursos impartidos han facilitado a las organizaciones que trabajaba de forma convencional a reformular sus estrategias de formación digital (online) y presencial.
- El desempeño de los participantes que han utilizado la plataforma ha tenido un incremento sustancial a diferencia de aquellos que no la han utilizado.
- Se han producido contenidos con referentes globales orientados a las nuevas necesidades para la resolución de problemas en contexto, con componentes y competencias requeridos bien definidos, en el mercado laboral y la empleabilidad, así como los propios de las organizaciones.
- Inmersión en el mundo digital de empleados y área estratégicas de las organizaciones, permeando decisiones estratégicas en los 3 niveles de las compañías Estratégico, táctico y operativo.
- El proyecto permite la identificación de oportunidades que pueden dar continuidad al proceso, entre estas se encuentran:
 - Desarrollo de una infraestructura tecnológica que soporte una plataforma con distintos cursos y recursos de formación.
 - Posibilidad de combinar enfoques metodológicos y de aprendizaje interdisciplinarios e inter-áreas
 - Posibilidad de potenciar las habilidades y competencias del talento en otros niveles para desempeñarse en diferentes escenarios de crecimiento organizacional.

6. CONCLUSIONES

En cuanto a la determinación del impacto de la implementación de la plataforma MOOC, se puede establecer que se ogra cumplir el objetivo principal, debido a que, dentro de los resultados presentados, existe una variación significativa de 0,7 puntos en promedio en las notas generales del curso en el antes y después de la utilización de esta herramienta, mejorando el rendimiento académico de los talento humano de nivel operativo participantes, reflejado en su parrilla de calificaciones presentadas en la en la Tabla 4.

Se puede mencionar que la participación del talento humano de nivel operativo en la implementación fue satisfactoria. En primera instancia, era una manera desconocida de trabajar, pero en el momento de la aplicación de las actividades en la plataforma se pudo evidenciar el interés del talento humano de nivel operativo participando en las actividades, principalmente por la flexibilidad de trabajo, el manejo del tiempo y las oportunidades que brinda esta estrategia.

De acuerdo con la tasa de aprobación del curso se evidenció un 76,92% de talento humano de nivel operativo que culminaron satisfactoriamente el curso de formación en la plataforma MOOC, cuando lo esperado era que al menos el 50% de los participantes aprobaran.

Se considera que el apoyo recibido por parte de las directivas de la empresa fue determinante para su éxito, quienes ven en esta plataforma un medio de soporte para los proyectos de virtualidad que se encuentran en curso en este momento en diferentes sectores del territorio colombiano y que su principal dificultad ha sido el bajo rendimiento y la deserción temprana del talento humano de nivel operativo.

Dentro del contexto institucional, el proyecto fue considerado un éxito y la Organizaciones realizó una invitación a su autor para presentarlo en la próxima edición de la Semana de innovación, donde en conjunto con otras iniciativas serán presentados los resultados del presente proyecto y el plan a seguir para darle usabilidad en todas las áreas que actualmente tiene la empresa.

REFERENCIAS

- [1] Reporte Edu Trends. (2016). Edición MOOCs. Tecnológico Monterrey.
- [2] Pertuz S. y Torres J. (2017). Lineamientos para el diseño de Cursos Online Masivos y Abiertos (MOOC) en Ingeniería Electrónica. *Entre Ciencia e Ingeniería* 11(21), 42-49.
- [3] Bakar N. et al. (2018). La implementación de la Gamificación en la plataforma de cursos en línea masivos abiertos (MOOC). En Conferencia Internacional sobre Ciencia e Ingeniería del Usuario. Singapur.
- [4] Figueroa C. (2004.). *Sistemas de evaluación académica*. Editorial Universitaria.
- [5] Bertram's A. y Dickhauser O. (2009). High-School students' need for cognition, self-control capacity, and school achievement: Testing a mediation hypothesis. *Learning and Individual Differences*.
- [6] Briet D. (2006). Un reto en la Formación del Profesorado. En VI Congreso Internacional Virtual de Educación CIVE.
- [7] Lane L. (2012). Three kinds of MOOCs. Recuperado: <http://www.lisahistory.net/wordpress/2012/08/three-kinds-of-moocs/>
- [8] MEN. (2011). *Mejorar el Rendimiento. Desafío de Nuestra Educación*. Ministeriode Educación Nacional.
- [9] Ospina J. et al. (2016). Massive open online courses in higher education: A data analysis of the MOOC supply. *Intangible Capital* 12(5).
- [10] Robles V. y Ruíz J. (2016). Implementación de un MOOC en cursos presenciales como estrategia para elevar el rendimiento académico. *International Journal of Technology and Educational Innovation* 2(38).
- [11] Sun W. y Sun X. (2011). Teaching computer programming skills to engineering and technology students with a modular programming strategy. *American Society for Engineering Education*.
- [12] Zichermann G. y Cunningham C. (2011). *Gamification by Design: Implementing game mechanics in web and mobile apps*. O'Reilly Media.
- [13] Pizarro R. (1985). *Rasgos y actitudes del profesor efectivo*. Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [14] MEN. (2022). *Mejorar el rendimiento. Desafío de nuestra educación*. Ministerio de Educación Nacional.
- [15] González J. (2006). B-Learning utilizando software libre: Una alternativa viable en Educación Superior. *Revista Complutense de Educación*.
- [16] Gómez J. (2013). La revolución MOOCs ¿Una nueva educación desde el paradigma tecnológico? *Comunicar* 41, 7-8.
- [17] García F. (2005). Definición de e-learning. *Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*.
- [18] Cormier D. y Gillis N. (2010) What is a MOOC? Recuperado: <https://congreso.dgire.unam.mx/2019/pdfs/8.M-Edu-Trends-MOOC.pdf>
- [19] Caballero C. et al. (2007). Relación de burnout y rendimiento académico con la satisfacción frente a los estudios en talento humano de nivel operativo universitarios. *Avances en Psicología Latinoamericana* 25(2), 98-111.

Aplicación y uso de conceptos de matemáticos en procesos ingenieriles: Caso de estudio Ingeniería de sistemas

Edwin Romero Cuero¹
Robinson Pulgarín Giraldo²
Universidad del Quindío
Colombia

Este trabajo tiene como propósito mostrar algunas aplicaciones de las Matemáticas en el contexto de la Ingeniería de sistemas, utilizando ejemplos relacionados con cifrado cesar, filtro bayesiano, complejidad computacional y el algoritmo de Page Rank. De igual manera, contribuye en los programas de Ingeniería de sistemas y afines con ejemplos prácticos, que pueden ser citados y utilizados por los ingenieros o profesores de matemática en la orientación de los cursos.

¹ Licenciado en Matemáticas y computación, y Magíster en Enseñanza de la matemática.

Contacto: eromero@uniquindio.edu.co

² Ingeniero de Sistemas y Magíster en Ingeniería.

Contacto: robinsonpg@uniquindio.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo trata sobre las aplicaciones de las matemáticas a la ingeniería de sistemas y computación, que se pueden abordar desde diferentes áreas como la seguridad informática, buscadores en la internet, algoritmos de clasificación en aprendizaje de máquina y análisis de algoritmos entre otras. La problemática principal que se tiene con las aplicaciones a la ingeniería de sistemas es que existen pocos trabajos que aborden de manera explícita o detallada el uso o aplicación, lo cual ha creado una brecha entre las matemáticas y sus aplicaciones en diferentes contextos.

Una de las aplicaciones es la relacionada con el algoritmo de Page Rank, que ha sido estudiado por [1], donde utiliza el page Rank y page Rank ponderado en la minería de la web para la extracción de datos de los usuarios en la red. Por otro lado, [2] proponen un algoritmo de clasificación que utiliza los registros de los motores de búsqueda para mejorar su calidad de recuperación, donde se utiliza el algoritmo de Page Rank en la relevancia de las páginas web para estimar las preferencias históricas de los usuarios que aparecen en los registros

Otro problema asociado con en el cifrado cesar, fue abordado por [3] en la realización de una aplicación móvil en el proceso de mensajería utilizando método de cifrado simétrico por sustitución y desplazamiento(cesar) para cifrar los mensajes de los clientes que utilicen la aplicación. En [4] también muestran las simulaciones de los diferentes cifrados y las implementan utilizando herramientas como MATLAB, VHDL y FPGA en forma detallada.

Por otra parte [5] realiza una clasificación de texto que contiene spoilers del clasificador de Naive Bayes y otro basado en máquinas de soporte vectorial, donde se analizan ambos resultados para comparar el mejor clasificador. Igualmente, [6] proponen utilizar el clasificador de Naive Bayes en la construcción de un algoritmo que permite evitar los correos Spam.

Además, [7] estudia algoritmos de problemas dinámicos de diferentes para hallar la ruta más corta y más rápida en sistemas de transportes inteligentes y propone a través de implementaciones algorítmicas y métodos experimentales una solución para mejorar la eficiencia en los problemas de rutas para datos en tiempo real. Y [8] en su trabajo realizan un modelo de aprendizaje profundo para mejor la vigilancia en tiempo real de videos cortos en línea para observar la cultura en el uso de la internet, el cual incluye teoría de complejidad computacional que permite optimizar la precisión del modelo.

Por lo tanto, el objetivo de este artículo es compilar cuatro aplicaciones de las Matemáticas en la Ingeniería de Sistemas y Computación, explicando tanto la teoría y el contexto a través de ejemplos en cada caso, Además de contribuir a los profesores del programa de matemáticas con algunos ejemplos de aplicación que sirvan de motivación o ruta en su estrategia de enseñanza a los estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas y Computación y de esta manera poder adaptar estos ejercicios de acuerdo a su grado de complejidad.

2. MÉTODO

Esta investigación se llevó a cabo utilizando una metodología combinada de entrevistas, consultas y diálogos presenciales con universidades, organismos de estado, asociaciones profesionales y empresas; además, se apoya en una revisión de la literatura y en consultas a estudiantes, profesores, empleadores, directivos y profesionales en ingeniería. La búsqueda se realizó en las bases de datos de ScienceDirect, Scopus y WOS, y entre los criterios de selección se tuvo en cuenta la trayectoria de los autores, la cobertura de la investigación, el tipo de investigación realizada y la contratación de los resultados.

Las herramientas de consulta se aplicaron de forma abierta, el mayor número de participantes provino de México, Argentina, España, Estados Unidos, Perú, Brasil y otros con menor participación. No se realizaron revisiones detalladas a los contenidos en los planes de estudios, ni a las políticas evaluativas y, aunque ambos factores tienen un impacto considerable en los procesos formativos, no se cubren más que tangencialmente y se mantienen como objetivo para una próxima fase de la investigación.

Se aclara que los estudiantes participantes pertenecen a la Era Digital y que se encontraban cursando, como mínimo, tercer año de su carrera. En la Tabla 1 se detalla los participantes de acuerdo con el rol que desempeñan en la ingeniería, y en las Figuras 1 y 2 se aprecia la distribución por actor y por país, respectivamente.

3. RESULTADO Y ANÁLISIS

3.1 Filtro de Naive Bayes

3.1.1 Bases teóricas

- *Teorema 1.* Probabilidad total [9]. Si los eventos $B_1, B_2, B_3, \dots, B_k$ constituyen una partición del espacio muestral S tal que $p(B_i) \neq 0$ para $i = 1, 2, \dots, k$; entonces, para cualquier evento A de S se aplica la ecuación (1).

$$p(A) = \sum_{i=1}^k p(B_i \cap A) = \sum_{i=1}^k p(B_i) p(A/B_i) \quad (1)$$

- *Teorema 2.* Regla de Bayes [9]. Si los eventos $B_1, B_2, B_3, \dots, B_k$ constituyen una partición del espacio muestral S , donde $p(B_i) \neq 0$ para $i = 1, 2, \dots, k$; entonces, para cualquier evento A de S , tal que $p(A) \neq 0$ se utiliza la ecuación (2).

$$p(B_r/A) = \frac{p(B_r \cap A)}{\sum_{i=1}^k p(B_i \cap A)} = \frac{p(B_r)p(A/B_r)}{\sum_{i=1}^k p(B_i)p(A/B_i)} \text{ para } r = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

3.1.2 Aplicación del Filtro de Naive Bayes

Consiste en predecir una clase o variable categórica independiente, dado un número de registros con diferentes atributos; es decir; encontrar el valor de C que maximice el valor $p(C/A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$, donde C , representa una variable categórica (variable dependiente) y $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ son los atributos o características (variables independientes). Para desarrollar esta aplicación, se tomará como base algunas columnas del dataset llamado Titanic que fue un transatlántico británico que se un dio en 1912. Este dataset se encuentra completamente en el repositorio gratuito de Kaggle y subido por [10]. Para este solo se tomarán las siguientes variables:

- *Survived:* variable categórica que indica si el pasajero sobrevivió o no, la cual será la objetivo (*target*).
- *Pclass:* es un proxy para estatus socio económico (Alta, Media, Baja).
- *Sexo:* sexo de una persona (Masculino o femenino).
- *Age:* edad del pasajero.

Tabla 1. Pasajeros del Titanic (a partir de [10])

Survived	Pclass	Sex	Age
Sobrevivio	alta	Femenino	30
Sobrevivio	alta	Masculino	12
no Sobrevivio	baja	Femenino	14
Sobrevivio	alta	Femenino	15
Sobrevivio	baja	Femenino	45
Sobrevivio	media	Masculino	34
Sobrevivio	baja	Masculino	11
no sobrevivio	baja	Masculino	25
Sobrevivio	baja	Femenino	23
no sobrevivio	baja	Femenino	17

En este ejemplo se pretende mostrar cómo funciona el clasificador de Naive Bayes para discurrir de manera automática de acuerdo a una variable objetivo (Survived) dadas ciertas características (Pclass, Sex y Age)

- *Primero.* Se calcula la probabilidad de la variable objetivo, es decir, $p(\text{Survived})$ según la ecuación (3).

$$p(\text{sobrevivio}) = \frac{7}{10}, p(\text{nosobrevivio}) = \frac{3}{10} \quad (3)$$

Cuando la variable es cualitativa se calcula a través de frecuencias y si es continua, su probabilidad estima a través de una distribución de probabilidad.

- *Segundo.* Con la ecuación (4) se calculan las probabilidades condicionales de cada característica o variable respecto al variable objetivo.

$$\begin{aligned}
 p(\text{baja/sobrevivio}) &= \frac{p(\text{baja} \cap \text{sobrevivio})}{p(\text{sobrevivio})} = \frac{3}{7} \\
 p(\text{media/sobrevivio}) &= \frac{p(\text{media} \cap \text{sobrevivio})}{p(\text{sobrevivio})} = \frac{1}{7} \\
 p(\text{alta/sobrevivio}) &= \frac{p(\text{alta} \cap \text{sobrevivio})}{p(\text{sobrevivio})} = \frac{3}{7} \\
 p(\text{baja/no sobrevivio}) &= \frac{p(\text{baja} \cap \text{no sobrevivio})}{p(\text{no sobrevivio})} = \frac{3}{3} = 1 \\
 p(\text{media/no sobrevivio}) &= \frac{p(\text{mediano} \cap \text{sobrevivio})}{p(\text{nosobrevivio})} = \frac{0}{3} = 0 \\
 p(\text{alta/no sobrevivio}) &= \frac{p(\text{alta} \cap \text{sobrevivio})}{p(\text{nosobrevivio})} = \frac{0}{3} = 0 \\
 p(\text{femenino/sobrevivio}) &= \frac{p(\text{femenino/sobrevivio})}{p(\text{sobrevivio})} = \frac{4}{7} \\
 p(\text{femenino/no sobrevivio}) &= \frac{p(\text{femenino} \cap \text{nosobrevivio})}{p(\text{femenino})} = \frac{2}{7} \\
 p(\text{masculino/sobrevivio}) &= \frac{p(\text{masculino} \cap \text{sobrevivio})}{p(\text{sobrevivio})} = \frac{2}{7} \\
 p(\text{masculino/no sobrevivio}) &= \frac{p(\text{masculino} \cap \text{nosobrevivio})}{p(\text{no sobrevivio})} = \frac{1}{7}
 \end{aligned} \quad (5)$$

- *Tercero.* Con la ecuación (5) se calcula la probabilidad para la variable *Age*, ya que esta es continua se asumirá que su distribución es normal.

$$P(A_i/c_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2_{ij}}} e^{-\frac{(A_i - \mu_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}} \quad (5)$$

Antes de calcular las probabilidades se debe calcular la varianza y la media de la variable *Age*, de acuerdo a los valores de cada clase (Tabla 2).

Tabla 1. Medias y varianza de los pasajeros sobrevivientes y no sobrevivientes

<i>Survived</i>	μ	σ^2
Sobrevivió	24,28	138,77
No sobrevivió	18,66	21,55

Con base en estos valores se probará el filtro de Naive Bayes, tomando como vector de características los valores obtenidos con las ecuaciones (6) a (8).

$$\begin{aligned}
 X &= (Pclass = alta, Sex = femenino, Age = 30) \\
 p(X/Survied = sobrevivio) &= p(Pclass = alta/Survied = sobrevivio) \quad (6) \\
 * p(Sex = femenino/Survied = sobrevivio) \\
 * p(Age = 30/Survied = sobrevivio) \\
 p(X/Survied = sobrevivio) &= \frac{3}{7} * \frac{4}{7} * 0.03081 = 0.00754
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p(X/\text{Survied} = \text{no sobrevivio}) &= p(\text{Pclass} = \text{alta}/\text{Survied} = \text{no sobrevivio}) \\
&* p(\text{Sex} = \text{femenino}/\text{Survied} = \text{no sobrevivio}) \\
&* p(\text{Age} = 30/\text{Survied} = \text{no sobrevivio}) \quad (7) \\
p(X/\text{Survied} = \text{no sobrevivio}) &= 0 * \frac{2}{7} * 0.00435 = 0
\end{aligned}$$

$$p(X/\text{Survied} = \text{sobrevivio}) > p(X/\text{Survied} = \text{nosobrevivio}) \quad (8)$$

Ya que el máximo valor de X se obtiene cuando la variable Survived, toma el valor de sobrevivió, entonces la persona será clasificada como sobrevivió.

3.2 Criptografía

3.2.1 Bases teóricas

La fórmula utilizada para desarrollar el cifrado está dada por la ecuación (9).

$$f(x) = (x + n) \text{ mod } p \quad (9)$$

Donde:

p es la longitud del alfabeto (en este caso es 27).

x es un número asociado a la letra (1 para la letra A, 2 para la letra B, etc.).

n es la clave dependiendo de la cual cambiara el código una vez codificado.

3.2.2 Aplicación Cifrado Cesar

El cifrado cesar es una técnica utilizada para codificar mensajes o palabras a través de una fórmula tomada aritmética modular que permite reemplazar la letra original por otra de acuerdo a una de desplazamiento dentro del alfabeto.

Ejemplo: Codificar la palabra ASCENSO tomando a A como la posición 1, y haciendo a $n=3$, teniendo en cuenta el alfabeto castellano. Para desarrollar este ejemplo se mostrarán los siguientes pasos:

1. Se construye un matriz de 3 filas con 9 columnas, ubicando en cada casilla las letras del alfabeto y ubicando debajo de cada letra los números ordenados del 1 al 27 (Tabla 3).

Tabla 2. Letras y orden de posición dentro del alfabeto

A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	2	3	4	5	6	7	8	9
J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q
10	11	12	13	14	15	16	17	18
R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
19	20	21	22	23	24	25	26	27

2. Se aplica la ecuación (10) en cada palabra para hallar las nuevas palabras (Tabla 4).

$$f(x) = (x + n) \text{ mod } p, n = 3 \text{ y } p = 27 \quad (10)$$

Tabla 3. Cálculo de las posiciones de las letras a codificar

Palabra	Número en la posición de la letra: x	Fórmula: $f(x) = (x + n) \text{ mod } p$	Letra de la codificación
A	1	$f(1) = (1 + 3) \text{ mod } 27 = 5$	E
S	20	$f(20) = (20 + 3) \text{ mod } 27 = 5$	V
C	3	$f(3) = (3 + 3) \text{ mod } 27 = 6$	F
E	5	$f(5) = (5 + 3) \text{ mod } 27 = 8$	H
N	14	$f(14) = (14 + 3) \text{ mod } 27 = 17$	P
S	20	$f(20) = (20 + 3) \text{ mod } 27 = 23$	V
O	16	$f(16) = (16 + 3) \text{ mod } 27 = 19$	R

Los valores resultantes de la función f serán las posiciones donde estará nueva letra que sustituirá la letra de la palabra original. Ejemplo en la primera casilla, se tiene $f(1) = (1 + 3) \bmod 27 = 5$, entonces se debe desplazar dentro del alfabeto hasta la quinta posición y se reemplaza la letra A por la letra E.

3. Por último, se establece la palabra original ya codificada (Tabla 5).

Tabla 4. Codificación de la palabra

Palabra original	Palabra codificada
ASCENSO	EVFHPVR

3.3 Algoritmo Pagera

3.3.1 Bases teóricas

Una figura $G = (V, E)$ consta de V , un conjunto no vacío de vértices (o nodos) y E , un conjunto de aristas (Figura 1) denominado grafo simple o no dirigido. Cada borde tiene uno o dos vértices asociados, llamados puntos terminales. Una arista conecta sus puntos terminales [11].

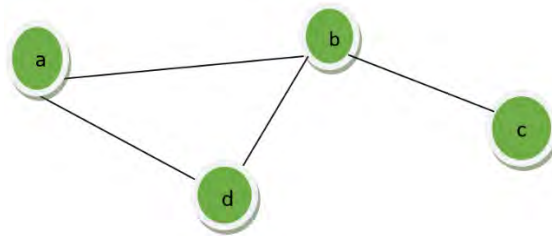


Figura 1. Grafo no dirigido

3.3.2 Grafo dirigido

Un gráfico dirigido (o dígrafo) (V, E) consiste en un conjunto de vértices V no vacío y un conjunto de aristas (o arcos) E dirigidos (Figura 2). Cada arista dirigida está asociada con un par ordenado de vértices. Se dice que el borde dirigido asociado con el par ordenado (u, v) comienza en u y termina en v [11].

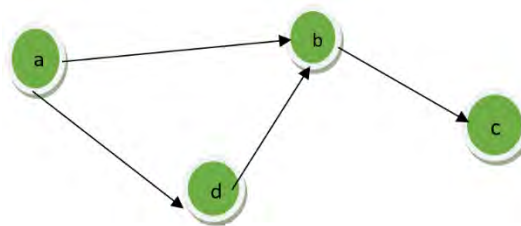


Figura 1. Grafo dirigido

3.3.3 Representación de grafos

Los grafos se pueden representar de dos formas: a través de tablas de adyacencia y a través de una matriz de adyacencia. A continuación, en la Figuras 3 y 4, y en las Tablas 6 y 7, se mostrará la tabla de adyacencia para grafos dirigidos y grafos no dirigidos.

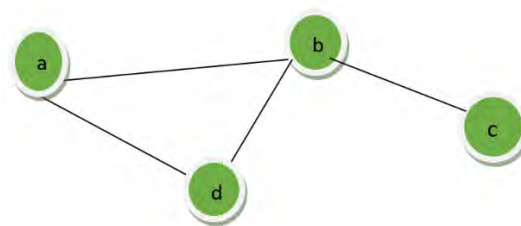


Figura 2. Grafo no dirigido

Tabla 5. Tabla de adyacencia para grafos no dirigidos

A	b,d
B	a,c,d
C	b
D	A,b

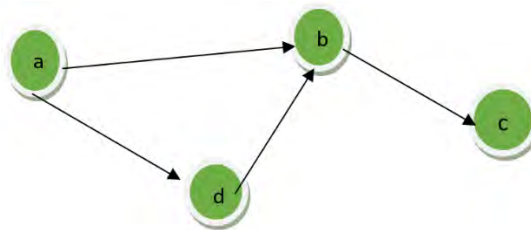


Figura 3. Grafo dirigido

Tabla 7. Tabla de adyacencia para grafos dirigidos

A	b, d
B	c
C	
D	b

- *Indegree:* Es el número de aristas para el cual el vértice i coincide con la cabeza de la arista [12].
- *Outdegree:* Es el número de aristas para el cual el vértice i coincide con la cola de la arista [12].
- *Matriz de transición:* Si hay una arista desde i a j y el outdegree del vértice i es d_i , entonces en la columna i y la fila j se escribe $\frac{1}{d_i}$. De lo contrario, se marca en la columna i , la fila j con un cero. Observe que primero miramos la columna, luego la fila. Por lo general, escribimos $\frac{1}{d_i}$ en el borde que va del vértice i al vértice adyacente j , obteniendo así un grafo ponderado [13].
- *Matriz de columnas estocásticas.* Una matriz se llama estocástica de columnas si todas sus entradas son mayores o iguales a cero (no negativas) y la suma de las entradas en cada columna es igual a 1. Si todas las entradas de una matriz son no negativas, entonces decimos que la matriz en sí mismo no es negativo. Además, una matriz es positiva si todas sus entradas son números reales positivos (mayores que cero) [13].

3.3.4 Aplicación algoritmo de PageRank

En este ejemplo se mostrará las matemáticas dentro del algoritmo de PageRank, esto será mostrado a través de un caso hipotético Figura 5, donde los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6 representan diferentes páginas web y los números sobre las aristas representan la importancia cedida por esa página i a las otras páginas.

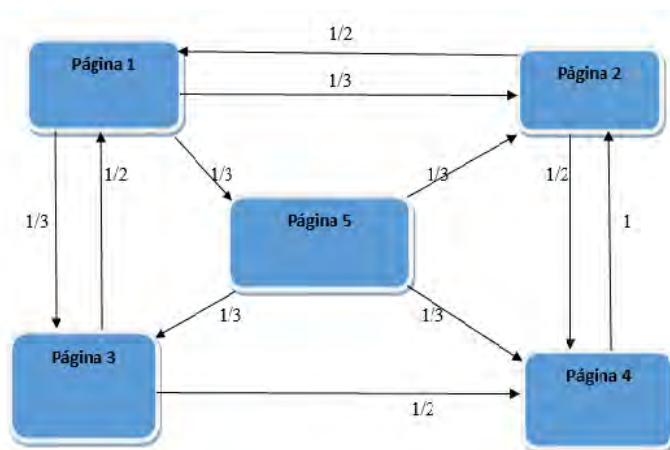


Figura 4. Matemáticas dentro del algoritmo de PageRank

Para mostrar los procesos matemáticos utilizados por el algoritmo se desarrollarán los siguientes pasos:

1. *Primero.* Se crea una matriz de transición respecto a la importancia cedida por cada página, por ejemplo, el nodo o página 1 tiene 3 aristas de salida hacia la página 1, 2 y 3, entonces cede $\frac{1}{3}$ de importancia para cada página, la página que cede importancia representa las columnas y la o las que reciben la importancia representan las filas de la matriz de transición:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2. *Segundo.* Se calcula un vector que muestra la probabilidad de que cada página sea seleccionada, la cual es $v = \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5} \right]'$. En la Figura 6 se muestra la matriz de transición y el vector en software Matlab.

```
>> format bank
>> A=[0 1/2 0 0 0;1/3 0 1/2 1 1/3; 1/3 0 0 0 1/3;0 1/2 1/2 0 1/3;1/3 0 0 0 0]

A =

     0     0.50     0     0     0
    0.33     0     0.50     1.00     0.33
    0.33     0     0     0     0.33
     0     0.50     0.50     0     0.33
    0.33     0     0     0     0

>> format bank
>> v=[1/5 1/5 1/5 1/5 1/5]

v =

    0.20
    0.20
    0.20
    0.20
    0.20
```

Figura 5. Matriz de transición y el vector en software Matlab

3. *Tercero.* Por último, se calculan las siguientes iteraciones $Av, A^2v, A^3v, \dots, A^k v$ hasta que los valores se comiencen a repetir, esto se muestra en la Figura 7.

<pre>>> A*v ans = 0.10 0.43 0.13 0.27 0.07 >> A^2*v ans = 0.22 0.39 0.06 0.31 0.03</pre>	<pre>>> A^3*v ans = 0.19 0.42 0.08 0.23 0.07 >> A^4*v ans = 0.21 0.36 0.09 0.27 0.06</pre>	<pre>>> A^5*v ans = 0.18 0.41 0.09 0.25 0.07 >> A^6*v ans = 0.20 0.38 0.08 0.27 0.06</pre>	<pre>>> A^7*v ans = 0.19 0.40 0.09 0.25 0.07 >> A^8*v ans = 0.20 0.38 0.09 0.27 0.06</pre>	<pre>>> A^9*v ans = 0.19 0.40 0.09 0.25 0.07 >> A^10*v ans = 0.20 0.38 0.09 0.27 0.06</pre>
---	---	---	---	--

Figura 6. Iteración 1 y 2; Iteración 3 y 4; Iteración 5 y 6; Iteración 7 y 8; e Iteración 9 y 10

Se puede observar que en la iteración 10 posee valores muy cercanos a los anteriores, lo que significa que el sistema se estabilizó y que el algoritmo del PageRank converge. Por lo tanto, podemos decir que el orden en que las páginas serán mostradas es el que se muestra en la Tabla 7.

Tabla 6. Orden en que las páginas serán mostradas

Valor	Página
0,38	2
0,27	4
0,2	1
0,09	3
0,06	5

3.4 Complejidad computacional

Uno de los retos más importantes de la programación es la comparación de algoritmos, ya sea en el consumo de recursos o en los tiempos de ejecución. Estos temas algunas veces pueden ser complejos de tratar ya que no se cuenta con un computador estándar que permita comparar todas las medidas, por esta razón la computación recurre a los conceptos matemáticos que le permitan crear dichas medidas entre estas se encuentran las notaciones asintóticas que permiten expresar el tiempo requerido por un algoritmo en ejecutarse salvo una constante multiplicativa en términos de *orden*. En este caso para definir el orden se usará la notación asintótica denominada O grande o complejidad de Lambda.

3.4.1 Notación asintótica O grande [14] (orden de una función)

Sea $f: N \rightarrow R^{\geq 0}$ función arbitraria de los números naturales en los reales no negativos. Se indica mediante $O(f(n))$ que se lee "O grande de $f(n)$ u orden $f(n)$ " al conjunto de todas las funciones $t: N \rightarrow R^{\geq 0}$ tales que $t(n) \leq f(n)$ para todo $n \geq n_0$ para una constante positiva real c y para un umbral entero n_0 . En notación matemática [14] (ecuación (12)).

$$O(f(n)) = \{t: N \rightarrow R^{\geq 0} | (\exists c \in R^+) (\forall n \in N) [t(n) \leq cf(n)]\} \quad (12)$$

El orden o complejidad de una función también puede ser expresada a través de límites como se ve en la regla del límite (ecuación (13)): sean f y $g: N \rightarrow R^{>0}$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} \in R^{>0} \text{ entonces } f(n) \in O(g(n)) \text{ y } g(n) \in O(f(n))$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = 0 \text{ entonces } f(n) \in O(g(n)) \text{ pero } g(n) \notin O(f(n)) \quad (13)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = +\infty \text{ entonces } f(n) \notin O(g(n)) \text{ pero } g(n) \in O(f(n))$$

De acuerdo con [14], las propiedades anteriores ayudarán a comparar a eficiencia de dos algoritmos en término los tiempos de ejecución de los mismos.

3.4.2 Tiempo de ejecución

De acuerdo con [15], una medida que suele ser útil conocer es el tiempo de ejecución de un programa en función de n , lo que generalmente, se denomina como $T(n)$, donde n es el tamaño del problema. Para relacionar la regla de límite con el tiempo de ejecución de un algoritmo, si se tienen T_1 y T_2 como dos funciones que representan el tiempo de ejecución de dos algoritmos diferentes, pero que realizan la misma tarea, se dirá lo expresado en la ecuación (14).

$$\text{Si } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{T_1(n)}{T_2(n)} = k \in R^{>0}$$

se dirá que $T_1(n)$ es equivalente a $T_2(n)$: ambos algoritmos tienen tiempo de ejecución muy similares.

$$\text{Si } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{T_1(n)}{T_2(n)} = 0$$

se dirá que $T_1(n)$ es menos complejo $T_2(n)$; es decir, el algoritmo relacionado con $T_1(n)$ se ejecuta primero que el relacionado con $T_2(n)$

$$\text{Si } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{T_1(n)}{T_2(n)} = +\infty$$

se dirá que $T_2(n)$ es más complejo $T_1(n)$; es decir, el algoritmo relacionado con $T_2(n)$ se ejecuta primero que el relacionado con $T_3(n)$.

3.4.3 Aplicación Complejidad Computacional

El siguiente ejemplo es una adaptación de [16]: Una empresa de desarrollo de software realiza dos algoritmos distintos con diferente complejidad que son capaces de encontrar la mínima trayectoria entre las ciudades mostradas en la figura 18 (ciudades colombianas), y ambos algoritmos pueden ser generalizados para n ciudades, la empresa desea conocer cuál de los dos algoritmos es más eficiente, es decir, para un número dado (muy elevado) de ciudades, cuál de los dos requiere de un tiempo de computación menor para llegar a la solución para ello, se tienen en cuenta las siguientes determinaciones:

- Matriz de distancia $D = d_{ij}$
- Orden de complejidad del primer algoritmo $n \log(n)$
- Orden de complejidad del segundo algoritmo n^2
- El número de operaciones a realizar depende del número de ciudades (o nodos) n implicadas

Para resolver este problema se recurrirá a la herramienta de los límites de funciones denominada regla de L'Hopital [17] (ecuación (15)).

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \log(n)}{n^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log(n)}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log(x)}{x} = \frac{\infty}{\infty} = \{L' Hopital\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x \ln 10} = 0.$$

Esto significa que, para valores grandes de n (No. de nodos o ciudades), $n \log(n) \ll n^2$, con lo que el algoritmo de orden $n \log(n)$ es mucho más eficiente (requiere menos operaciones para llegar a la solución) (Figura 8).

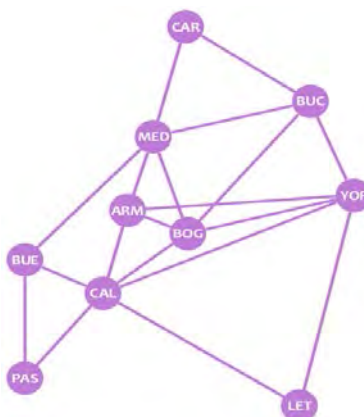


Figura 7. Grafo: Algunas ciudades colombianas [18]

4. CONCLUSIONES

Una de los temas de discusiones dentro en la Ingeniería de Sistemas y Computación ha estado relacionado con la aplicación de las matemáticas, no solo de manera general sino también en forma específica, ya que es común encontrar libros de matemáticas que contengan ejercicios de aplicaciones de otras ingenierías, como ejercicios de vigas en ingeniería civil o circuitos para la ingeniería electrónica y eléctrica.

Estudios realizados por [19], considera que las matemáticas contribuyen a la ingeniería de Sistemas y Computación en diferentes áreas del conocimiento tales como: la lógica en programación, bases de datos y arquitectura de computadora; los grafos y árboles en programación y estructura de datos; autómatas en inteligencia artificial.

Así mismo, [20] afirma que en la ingeniería de sistemas las materias como matemáticas discretas, lógica, teoría de conjuntos, análisis numérico, estadística y probabilidad, son esenciales para el análisis de sistemas de información y profundización teórica de modelos bases de datos, lo estudios mencionados contrastan con la temática propuesta en este escrito, donde se resalta la importancia de las aplicaciones de matemáticas con ejemplos concretos que sirvan como guía y que permitan aproximar al estudiante con ayuda del profesor a las aplicaciones desde las matemáticas básicas a los diferentes espacios académicos en Ingeniería de Sistema y Computación.

REFERENCIAS

- [1] Jain R. y Purohit D. (2011). Page ranking algorithms for web mining. *International journal of computer applications* 13(5), 22-25.
- [2] Baeza R. et al. (2004). Query clustering for boosting web page ranking. En *International Atlantic Web Intelligence Conference Springer*. Berlin, Germany.
- [3] Monterroza A. y Buitrago J. (2021). Implementación de una aplicación móvil de mensajería con cifrado simétrico por sustitución y desplazamiento. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [4] Granda M. y Reina P. (2013). Estudio, simulación e implementación de estándares de cifrado simétrico, utilizando MATLAB, VHDL y FPGA. En *XXV Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*. Quito, Ecuador.
- [5] Altamirano Z. et al. (2007). Text mining aplicado a la clasificación y distribución automática de correo electrónico y detección de correo spam. Trabajo de grado. Escuela superior Politécnica del litoral.
- [6] Chabini L. (1998). Discrete dynamic shortest path problems in transportation applications: Complexity and algorithms with optimal run time. *Transportation research record* 1645(1), 170-175.
- [7] Li H. et al. (2020). Application of computational complexity theory to pornographic detection in live based on frame sampling. En *6th International Conference on Computer and Communications*. Chicago, USA.
- [8] Walpole R. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Pearson.
- [9] Ali S. (2021). Kaggle. Recuperado: <https://www.kaggle.com/hesh97/titanicdataset-traincsv>
- [10] Rosen K. (2007). *Discrete mathematics and its applications*. McGraw-Hill.
- [11] Radu R. (2021). The mathematics of web search. Recuperado: <http://pi.math.cornell.edu/~mec/Winter2009/RalucaRemus/index.html>
- [12] Walpole R. (1992). Probabilidad y estadística. McGraw-Hill.
- [13] Brassard G. y Bratley P. (1997). *Fundamentos de algoritmia*. Prentice-Hall.
- [14] Mañas J. (2021). Academia. Recuperado: https://www.academia.edu/32790423/An%C3%A1lisis_de_Algoritmos_para_Ingenier%C3%ADa_de_Sistemas_y_Computaci%C3%B3n
- [15] Molinàs P. (2021). Aplicaciones de las derivadas. *Aplicaciones de las derivadas*. Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD).
- [16] Leilthold L. (2010). *El Cálculo*. Incorporados S.A.
- [17] Codingame. (2021). Recuperado: <https://www.codingame.com/playgrounds/7023/fundamentos-de-teoria-de-grafos/fundamentos>
- [18] González J. y Lantigua M. (2017). Contribución de la matemática discreta a la formación del ingeniero informático. *Contribución of the discreet mathematics to the computer engineer's formation*. *Científica Pedagógica* 45, 18-30.
- [19] Castrillón E. (2010). Las ciencias básicas en ingeniería de sistemas: Justificaciones gnoseológicas desde los objetos de estudio y de conocimiento. *Revista educación en Ingeniería* 5(10), 74-84.

Aplicación de Building Information Modeling BIM en el entorno educativo para el desarrollo de proyectos arquitectónicos

Néstor Ariel Gómez Quisoboni¹

Juan David Cortes León²

Fundación Universitaria de Popayán
Colombia

Building Information Modeling BIM es una metodología que se ha popularizado lentamente en los últimos años en Colombia, aunque en varios lugares del mundo ya está implementada con estándares definidos, países tales como Singapur, España, Reino Unido, entre otros. Esta metodología surgió como respuesta a una serie de necesidades y deficiencias en la industria de la construcción y el diseño para mejorar sus procesos y utilidades, pero su implementación no ha evolucionado muy rápido por aspectos culturales o de infraestructura necesarios. A nivel mundial la tecnología cambia con velocidad, por esta razón se debe adoptar y manejar de buena forma la metodología BIM, no solo pensando en edificaciones, sino en infraestructura, renovación urbana, todo lo puede abarcar BIM es un concepto muy global. El resultado de esta investigación se implementará en la Facultad de Arquitectura de la Fundación Universitaria de Popayán, Colombia. El programa está concebido como un espacio de formación integral de personas en el ámbito del diseño, de la construcción, el urbanismo, el patrimonio y el paisajismo, capaces de responder a los retos propios del momento histórico y lugar en el que se desempeñen como profesionales éticos e idóneos. De allí que sea necesario considerar el concepto de Escuela de Arquitectura como un escenario de interdisciplinariedad que aporta significativamente al territorio, al crecimiento económico regional y a los múltiples encadenamientos e impactos sociales positivos que ha producido el programa a lo largo del tiempo en la región. Por eso la importancia de fortalecer el uso de las herramientas BIM para mejorar los procesos de diseño y tecnología para la ejecución de proyectos.

¹ Técnico en Producción pecuaria y Arquitecto.

Contacto: joven.investigador.arquitectura@fup.edu.co

² Arquitecto y Especialista en Talento humano.

Contacto: coordinacion.arquitectura@fup.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La implementación de metodologías BIM para el desarrollo y ejecución de proyectos de construcción ha cobrado una importancia significativa en el sector tanto privado como público, por la alta eficiencia que se logra tanto en la optimización del uso de los recursos, que traduce ahorro en costos, como en el trabajo interdisciplinario que logra armonizarse para mejorar los tiempos a la posteridad, el mantenimiento de las edificaciones construidas.

La academia desde luego ha ido respondiendo a la demanda en el mercado laboral que implica la modernización en los procesos constructivos, el uso de softwares que aporten al desarrollo de un trabajo cohesionado y colaborativo, por parte de los distintos profesionales que intervienen en el proceso constructivo, requiere que los estudiantes, profesionales en formación, adquieran en su etapa formativa las herramientas que les permitan estar actualizados ante tales demandas, así como también les ayuden a vivir un proceso educativo en el cual puedan aplicar los conocimientos adquiridos para mejorar su experiencia académica.

Es por eso que en este trabajo investigativo, se ha propuesto, en primera medida, indagar acerca de cuáles son los programas que habitualmente usan los estudiantes en el desarrollo de sus actividades académicas relacionadas con la realización de proyectos arquitectónicos, y seguidamente, brindarles una experiencia de apropiación de conocimiento del programa BIM Revit a partir de la elaboración de un proyecto académico en dicho programa, con ello finalmente documentar una guía que les sea de insumo a la comunidad académica en la elaboración de sus proyectos arquitectónicos. Esto se ha pensado, además, con el ánimo de que los estudiantes mejoren su proceso académico a partir del uso de este software que les permita optimizar tiempo en la realización 2D y 3D de sus proyectos a presentar en la Universidad, y, desde luego también, en su vida laboral.

La investigación se implementará en la facultad de arquitectura de la Fundación Universitaria de Popayán la cual se encuentra ubicado en el municipio de Popayán, capital del Departamento del Cauca en la República de Colombia, se encuentra a una altitud de 1.738 metros sobre el nivel del mar, msnm, con una temperatura media de 19°C, La población estimada es de 270.000 habitantes aproximadamente en su área urbana. Con una extensión territorial es de 512 km². Temperatura media de 18° a 19°C durante todo el año.

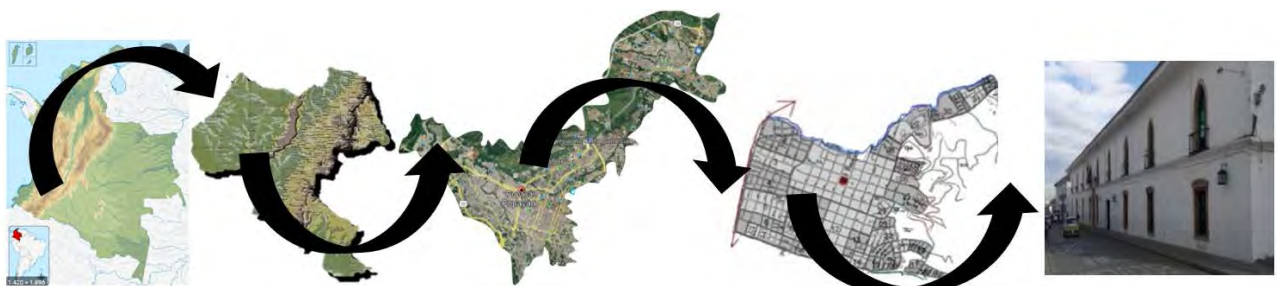


Figura 1. Localización área de estudio: País Colombia, Departamento Cauca, Municipio Popayán, Comuna Cuatro, Programa Arquitectura

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Definición de BIM

Para [1] Building Information Modeling BIM es un proceso inteligente basado en modelos 3D que ofrece a los profesionales involucrados en proyectos de arquitectura, ingeniería y construcción AEC, la información y las herramientas necesarias para planificar, diseñar, construir y gestionar edificios e infraestructuras eficientemente. [2] afirma que es una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de un proyecto de construcción. Su objetivo es centralizar toda la información del proyecto en un modelo de información digital creado por todos sus agentes. De acuerdo con [3], BIM es un proceso de construcción digital en 3D en el que la información sobre cada uno de los componentes del proyecto es gestionada y compartida por todo el equipo constructivo a lo largo del ciclo de vida del edificio.

Dadas estas definiciones se aclara que BIM, no es solo un modelo virtual en 3D sin información, es mucho más porque facilita la unificación y articulación del modelo arquitectónico de un edificio, por ejemplo, con el resto de los sistemas que contemplan el proyecto, diseño de estructuras, costos, entre otros. Es decir que, ayuda a organizar la información y esto se constituye en una herramienta que ahorra tiempo y recursos. En la Figura 2 un modelo tridimensional que contiene toda la información relacionada con el edificio durante todo su ciclo de vida, aquí se puede comprender todas las fases que compone al proyecto desde su concepción inicial, durante su construcción y toda su vida útil, hasta su demolición.

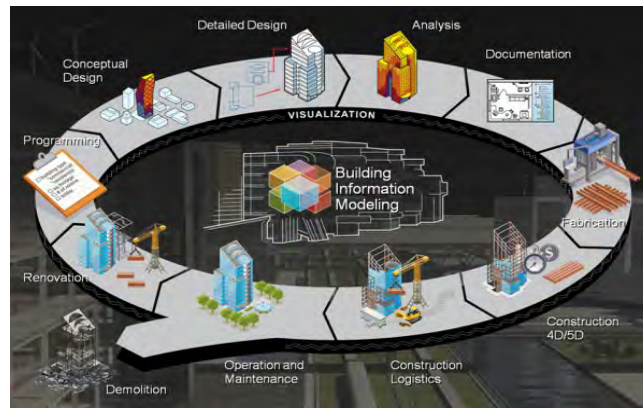


Figura 2. Ciclo de vida del Modelo BIM

Ahora bien, en cuanto a la metodología del BIM, se divide en etapas o dimensiones, así: 2d y 3d modelo espacial, 4d tiempo, 5d control de costos y gastos, 6d ambiente, 7d operación y mantenimiento tal como se confirma en [4]. Las dimensiones BIM entonces se refieren a los diferentes niveles de información de un modelo:

- 3D: modelado tridimensional
- 4D: gestión de la programación (análisis de tiempos)
- 5D: gestión de la información económica (análisis de costes)
- 6D: evaluación de la sostenibilidad (social, económica y ambiental)
- 7D: gestión y facility management

De igual manera [5] argumenta que:

Las primeras dos dimensiones de BIM se encargan de las tareas de investigación, planeamiento, implementación y procesamiento de datos en los softwares respectivos, mientras que las siguientes dimensiones agregan la oportunidad de trabajo a través de información adicional para el desarrollo y gestión del proyecto a lo largo de su ciclo de su vida. Las distintas etapas de diseño, construcción y gestión de una infraestructura, junto con las fases de mantenimiento y desmantelamiento, transcurren inmersas en una dinámica de trabajo en la que, al presente, pueden destacarse 7 dimensiones diferentes.

En tal sentido en la Figura 3 podemos ver las diferentes etapas o dimensiones BIM en las que se pueden integrar a la hora de generar un proyecto.

2D / 3D	4D	5D	6D	7D
Modelo Espacial (integrated data model)	Tiempo (Scheduling)	Control de Costos y Gastos (Estimating)	Ambiente (Sustainability) Green BIM	Operación y Mantenimiento (FACILITY MANAGEMENT)
Visualización del Proyecto	Programación, Construcción de EDT	Estimación de recursos: materiales, Equipos y Mano de Obra	Sustentabilidad Ambiental	Documentación BIM "As Built": Obra conforme al Proyecto
Documentación Gráfica	Simulación de fases del Proyecto. Control dinámico	Presupuesto de la obra	Análisis de eficiencia Energética	Control Logístico de funcionamiento
Objetos con propiedades	Diseño del Plan de Ejecución	Análisis de rentabilidad: Construcción, Uso y mantenimiento	Análisis LEED [Leadership in Energy & Environmental Design]	Ciclo de vida útil BIM y servicios asociados

Ingeniero Civil, MSc.
Leonardo Mata Rojas
CEO de Bases BIM

BIM: Building Information Modeling

Figura 3. Etapas o Dimensiones BIM

2.2 Estandarización del BIM

Establece el correcto uso de las herramientas, ordena la organización del edificio por niveles y normas para la publicación de los modelos.

2.2.1 Metodología open BIM (Building Smart)

Esta metodología, hace referencia a la manera como a través de guías se puede obtener una herramienta para elaborar Modelos de Información de Construcción, con una guía de Usuarios estándar. Como se dijo anteriormente esta guía es una adaptación del COBIM finlandés que se adapta a entornos de trabajo diversos en [2] afirma que:

Su objetivo es centralizar toda la información del proyecto en un modelo de información digital creado por todos sus agentes. BIM supone la evolución de los sistemas de diseño tradicionales basados en el plano, ya que incorpora información geométrica (3D), de tiempos (4D), de costes (5D), ambiental (6D) y de mantenimiento (7D). El uso de BIM va más allá de las fases de diseño, abarcando la ejecución del proyecto y extendiéndose a lo largo del ciclo de vida del edificio, permitiendo la gestión del mismo y reduciendo los costes de operación.

2.2.2 Archivos IFC

Este es un formato de datos de especificación abierta. Se desarrolló por el IAI (International Alliance for Interoperability), predecesora de la actual Building Smart, con el propósito de convertirse en un estándar que facilite la interoperabilidad entre programas del sector de la construcción [1]. En el mismo sentido [2] dice que:

las clases y objetos IFC muestran un modelo de información tanto geométrico como alfanumérico, siendo muy útil estas dos formas de representación; el cual está formado por un conjunto de más de 600 clases, con un constante aumento, este formato, determina la normatividad de los desarrolladores BIM, de su cumplimiento deriva el logro de intercambio de información entre programas distintos.

Gracias a formato, se conectan modelos con funcionalidad y propiedades específicas. Ahora bien, cada programa puede necesitar algunos datos específicos, un programa estructural puede soportar un modelo arquitectónico, y es posible que necesiten información de capacidad estructural de un muro, por ejemplo, pero no sus propiedades acústicas. El hecho de traspasar de un programa a otro un muro y sus relaciones geométricas, ahorra tiempo y recursos, por lo que se constituye en una herramienta de considerable utilidad para el desarrollo del proyecto, ya sea para la entrega, la documentación o la gestión del mantenimiento del mismo [6].

En la Figura 4 se aprecia un modelo con su geometría y datos los cuales son integrados en un formato de datos IFC, que funciona como un formato de archivos estandarizados para el intercambio entre distintos softwares como Revit, tekla, Navisworks entre otros.



Figura 4. Intercambio de información IFC

2.2.3 Ventajas del IFC

El IFC ofrece varias ventajas, pero la principal es la posibilidad de interconexión de los componentes y agentes que intervienen en la construcción, ya que facilita la interacción, por medio de un formato estándar. Entonces, los datos del modelo constructivo son definidos solamente una vez por cada agente responsable,

y son compartidos por los demás. Con esto, se consigue un aumento de la calidad, la reducción de los costos, y la oportunidad de tener a mano toda la información del proyecto, durante su ejecución:

En algunas de las primeras implementaciones BIM en la construcción llevadas a cabo hasta la fecha el ahorro en costes final se estima en un 12.5% del coste total según estudios realizados en España, lo cual es una suma que puede incluso superar al coste del propio proyecto de ingeniería, esto quiere decir que el ahorro económico se vuelve verdaderamente importante para los constructores y propietarios del proyecto, más que para los diseñadores de este [2].

Se puede añadir que, además de las ventajas en desarrollo, la información sistematizada, resulta fundamental para futuros proyectos, debido a que queda una memoria documental cercana a la realidad, para corregir o fortalecer próximas propuestas de construcción.

2.3 Etapas del BIM

2.3.1 Modelado y diseño paramétrico: 2D/3D - Arquitectura, Estructura e Instalaciones

Según [2]: La primera etapa que conforma el BIM sería el modelado paramétrico arquitectónico de un proyecto, el cual posteriormente pasa al cálculo y diseño estructural y a su vez al cálculo de las diferentes instalaciones MEP que este debe tener. De acuerdo a lo anterior, hay dos tipos de programa: la representación, cálculo y dimensionado. Sin embargo, es de acotar que, en la actualidad un programa como el REVIT 2017, incorpora módulos de estructura e instalación.

Siguiendo con [2] algunas de las ventajas radican en que es posible dibujar y representar en un modelo tridimensional las partes del proyecto ya sean partes arquitectónicas, estructurales o de instalaciones, que ayudan a detectar dificultades de distinta clase, como incongruencias o interferencias; en aras de tener una visión integral general del proyecto; que se traduce, como ya se ha expresado, en economía de tiempo y recursos. En ese mismo contexto en la Figura 5 podemos observar un proyecto modelado en Revit en 2017 que contiene vista 3d, facha y plano 2d.

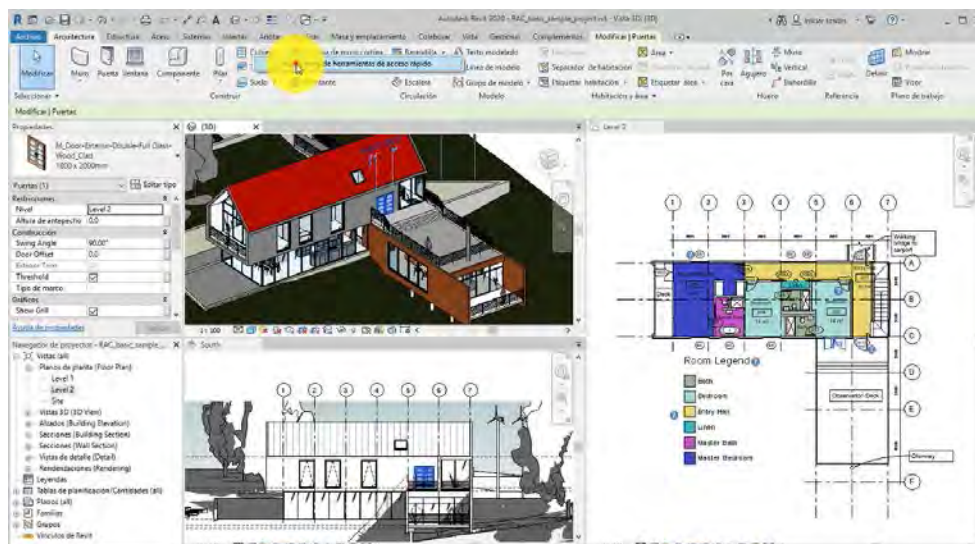


Figura 5. Vista 3D, Plano, y Fachada del Proyecto ejemplo Revit 2017

Sin duda alguna, muchas de sus ventajas es contar con planos, cortes y fachadas; de diseño arquitectónico, estructural. se puede citar algunos de los programas de cálculo y dimensionamiento: Robot Structural Analysis, Etabs, SAP 2000, Staad Pro, CYPECAD MEP, entre otros.

2.3.2 Planificación y gestión de proyectos: 4D - Tiempo

En todo proyecto de construcción el tiempo es un elemento central, Si se tiene acceso a un modelo 3D, podemos conseguir una representación virtual del proceso de construcción en tiempo real [6]. [7] asegura que BIM 4D nos permite analizar y controlar los tiempos de construcción. De esta forma, los proyectistas

pueden coordinar/planificar las actividades relacionadas con el proceso de construcción del edificio. El modelado 4D permite a los proyectistas ver el progreso temporal de las actividades desde la fase de diseño, con el fin de obtener importantes ventajas como la optimización del tiempo, detección de errores a priori y planificación.

De manera similar [6] sostiene que 4D BIM (la cuarta dimensión del BIM) es la organización de las actividades relacionadas con el tiempo del modelo y para extraer y visualizar el progreso de las actividades durante el ciclo de vida del proyecto.

En la Figura 6 se puede apreciar un modelo de simulación 4d del edificio de harbor center arena de Monterson Construction de Nueva York, en él se puede ver la etapa de construcción del proyecto.

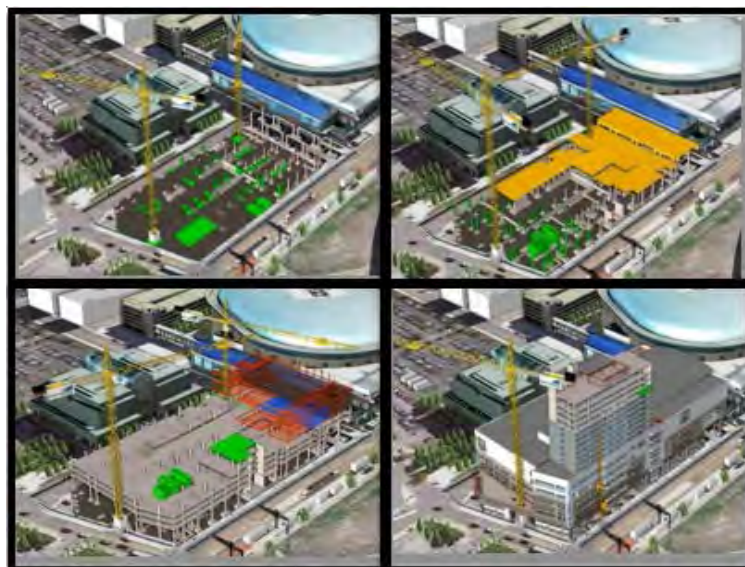


Figura 6. Secuencia de la Simulación, Planificación y construcción del edificio Harbor Center Arena de Monterson Construction (Nueva York) con el Software SYNCHRO Pro

Se puede, de forma sumaria, recalcar en las ventajas además de las que se ha venido comentando aunado a esto [6] dice que hay un conocimiento completo del proyecto desde su fase de diseño hasta la finalización del proyecto. Mayor adaptabilidad del cronograma en cambios durante la construcción de la obra ahorrando dinero a su vez por cambios a última hora.

Disminuir los riesgos y condiciones de seguridad y salud durante la obra. Integrar y coordinar subcontratistas y proveedores en cada fase del proyecto. Del mismo modo, algunos de los programas más destacados son: Synchro, VICO (Trimble), Navisworks (autodesk) entre otros. Los cuales enlazan un diagrama de Gantt, con un modelo realizado en un programa de representación BIM como por ejemplo Revit.

2.3.3 Mediciones y costos: 5D - Control de Costos

Continuando con las etapas del BIM, y haciendo uso de la información del modelo 3D parametrizado, es factible realizar el cálculo de las mediciones virtuales, para obtener un acercamiento cuantitativo a la realidad de los costos. BIM 5D conecta los procesos de costes y estimaciones directamente a los modelos 3D creados por el diseñador; incorporando la estimación de costes en el ecosistema BIM es posible acelerar y optimizar toda la fase de diseño de un edificio, incluso en relación al aspecto económico. Se piensa, por ejemplo, en poder evaluar rápidamente los costes ligados a soluciones de diseño diferentes [6].

No sobra reiterar la ventaja que da a los proyectistas tener esta herramienta, pues el ahorro en recursos y tiempo es destacado; se cuenta con algunos programas que trabajan con tecnología 5D: Presto, CYPE ingenieros, Vico, Medit (Autodesk) etc. Asimismo, en la Figura 7 podemos ver un modelo de ejemplo de Revit 2017 al cual le realizaron presupuesto con software Presto.

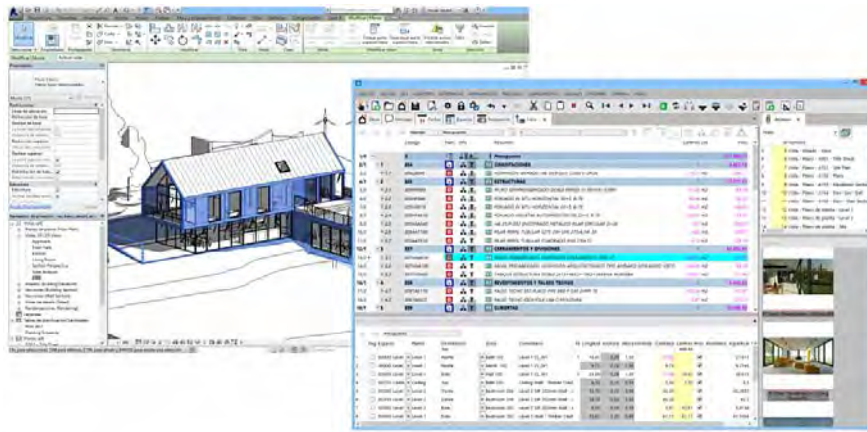


Figura 7. Presupuesto realizado con Presto, enlazado a el modelo ejemplo de Revit 2017

2.3.4 Análisis de eficiencia energética: 6D - Ambiente y Sustentabilidad

En concordancia con lo que nos aporta [2] como fruto de la labor de concientizar sobre el problema ambiental del mundo, en cuanto al buen uso y aprovechamiento de los recursos, se incorpora la etapa BIM 6D, la que facilita el análisis de eficiencia energética y la sustentabilidad. Por este motivo, muchos países, exigen la implementación de la metodología BIM. Hace un tiempo, los estudios y análisis, se efectuaban con herramientas externas al proyecto tal como se menciona en [6]:

Ahora, con la incorporación de la tecnología BIM 6D se puede tomar el modelo paramétrico en 3D, el cual contiene los parámetros y propiedades técnicas de los materiales utilizados en el proyecto (por ejemplo, la capacidad de transferencia térmica, consumo de CO₂, entre otros) y enlazarlos con aplicaciones de cálculo de eficiencia energética, para poder hallar las mejores soluciones constructivas con el fin de reducir el consumo energético.

Las simulaciones energéticas que podemos realizar en un modelo BIM en desarrollo, nos ayudará para que nuestro proyecto cumpla los requisitos establecidos en cuanto a eficiencia energética, el 6D permite obtener los resultados del aporte que se le está haciendo al planeta y de esta manera emplear la menor cantidad posible de recursos energéticos. Nos permite reducir el consumo de cualquier tipo de energía y con ello los posibles impactos ambientales asociados a ella [8].

Entre los programas más empleados para la aplicación de BIM 6D están: Autodesk Green Building, que exporta modelos 3D realizados en Revit, hace el análisis del uso de la energía, el agua, las emisiones de CO₂, datos como por ejemplo el rendimiento del edificio; todo esto, representado en gráficos que dan cuenta de aspectos neurálgicos como intensidad energética, consumo y costo anual de energía y promedio de energía. De otra parte, se puede mencionar programas como Ecodesigner (Graphisoft) y Heavacomp Simulator V8i (Bentley) que ofrecen aplicaciones y funciones específicas en beneficio del proyecto y su desarrollo. En la Figura 8 se puede evidenciar la sexta dimensión del BIM aplicado a la eficiencia energética de esta manera obtener los resultados de recursos energéticos e impactos ambientales.

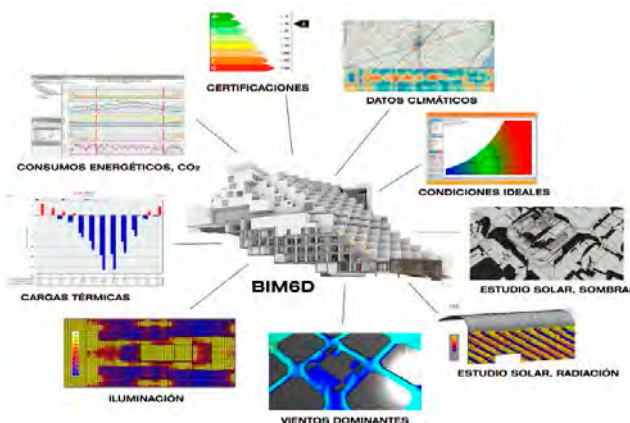


Figura 8. BIM6D - La sexta dimensión del BIM: BIM aplicado a la eficiencia energética

2.3.5 Administración, operación y mantenimiento: 7D - Facility Management

La etapa de operación y mantenimiento de un edificio representa un costo mucho mayor que las etapas de diseño y construcción, en la metodología BIM se agrega el Facility Management FM, que son aplicaciones y servidores que permiten en manejo y administración de un proyecto durante toda su vida útil, desde la etapa de diseño, pasando por la etapa de la construcción hasta llegar a la operatividad mantenimiento e incluso demolición [2].

En BIM 7D [6] sostiene, Para manejar mejor todos los aspectos de la facility management directamente en un solo modelo BIM, es necesario un software o aplicación dedicada al control, verificación y mantenimiento de activos. Una aplicación de este tipo se utiliza para gestionar: Zonas, asset, planes de mantenimiento, actividades de mantenimiento, todas las demás actividades posibles a realizar sobre el inmueble durante su ciclo de vida.

Una de las aplicaciones más usadas usBIM.facility del BIM management system usBIM para la gestión del mantenimiento de construcciones e infraestructuras y la integración avanzada de todas las funciones de facility management con el modelo BIM y con el sistema de documentos de *digital twin* [6]. Es así como en la figura 9 permite apreciar el ciclo de vida de un proyecto o infraestructura, además, del control logístico y operacional, durante el uso, mantenimiento, inspección de la vida útil del proyecto.

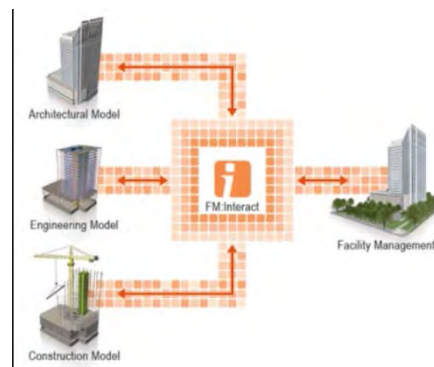


Figura 9. Esquema de Interoperabilidad entre las diferentes etapas BIM y el FM

Las siguientes son ventajas del Facility Management: Trabajo bidireccional entre las aplicaciones FM y los modelos BIM, conectados a internet a través de un servidor compartido o *nube*. Conexión de los datos de las demás etapas 3D, 4D, 5D, 6D (Diseño, planificación, gestión, construcción y mantenimiento). Sincronizar los elementos del modelo BIM con equipos del FM. Realizar planes de mantenimiento [6].

Tanto la etapa 2D Y 3D conforman la primera etapa o fase, pasa dar paso a las 4D, 5D y 6D. Aunque, es posible trabajarlas de modo paralelo, hasta llegar a la etapa 7D. Todos estos recursos, programas, funciones y aplicaciones, para hacer que un proyecto de construcción sea más efectivo, pertinente y económico en términos de tiempos, de mano de obra y de recursos económicos en general. Con el uso y aplicación de este tipo de herramientas en la planeación, organización, desarrollo y evaluación de un proyecto, seguramente los resultados van a ser más específicos, concretos y medibles.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 Historia de la representación de proyectos

Las primeras representaciones que conocemos son las pinturas rupestres, en ellas no solo se intentaba representar la realidad que le rodeaba, animales, astros, al propio ser humano, entre otros, sino también sensaciones, como la alegría de las danzas, o la tensión de las cacerías. [9] afirma que: Los primeros tiempos La transmisión de información en forma documental entre los humanos ha sido una actividad primordial desde los inicios de la existencia del hombre, que ha utilizado básicamente tres vehículos, a saber: El lenguaje gráfico, el lenguaje simbólico, el Lenguaje escrito De cada uno de estos sistemas existen vestigios y documentos muy diversos y conocidos, tales como las pinturas rupestres, que pueden considerarse como

las primeras representaciones gráficas. En la Figura 10 se puede apreciar una pintura rupestre situada en la provincia de Albacete (España) donde comunica o relata una escena de su vida cotidiana para este caso la técnica que utilizan es el dibujo y representa la cacería.



Figura 10. Dibujos rupestres de la cueva de Alpera, situada en la provincia de Albacete (España)

Un avance posterior son los lenguajes simbólicos como precedente la escritura cuneiforme que representa palabras y objetos 9. [10] argumenta que el cuneiforme es un sistema de escritura desarrollado por primera vez por los antiguos Sumerios de Mesopotamia (3500-3000 antes de la era común). Está considerado como la contribución cultura más importante de las muchas que aportaron los sumerios, y la más importante de la ciudad sumeria de Uruk , que propició la escritura cuneiforme alrededor del 3200 antes de la era común. La Figura 11 representa un sistema de documentación escrita y la materialidad que utilizaban era la arcilla, la moldeaban y allí representaban simbologías de escritura.



Figura 11. Dibujos rupestres de la cueva de Alpera, situada en la provincia de Albacete (España)

Una de las principales manifestaciones en la arquitectura es la planta encontrada en la estatua rey sumerio de Gudea ya que sobre sus rodillas lleva una tabla con el plano del templo convirtiéndose en uno de los principales hallazgos para la arquitectura.

[10] afirma que como primera manifestación del uso en arquitectura e ingeniería puede citarse el considerado como el primer plano del que ha quedado constancia: la planta de un zigurat (templo de configuración escalonada) esculpido sobre un tablero de dibujo (y acompañado de los utensilios utilizados para dibujarlo), que forma parte de la estatua del rey mesopotámico Gudea de Lagash que se encuentra en el Louvre y datada en el año 2130 antes de la era común.

[11] y [12] argumenta este evento significó un hecho determinante en la concepción del dibujo, dando lugar a la primera manifestación del dibujo técnico en el año 2450 a.C. En una escultura del rey sumerio Gudea, llamada *El Arquitecto*, ubicada actualmente en el museo Louvre de París, se esculpió un dibujo de construcción que representa en forma esquemática los planos de un edificio.

Con el Rey sumerio Gudea (Figura 12) encontraron trazos geométricos, en la parte de sus extremidades se ven los planos en forma de alzado de un edificio el cual contiene los trazos de su propio palacio, Gudea contiene el plano del propio templo en la parte de sus extremidades inferiores, que constituye, curiosamente, un templo dentro de una estatua dentro de un templo, [11] argumenta lo que es realmente notable es que la regla graduada y el plano pudieron ser utilizados por los investigadores, entre otros métodos, para reconstruir la metrología acadio-sumeria, esto es, el sistema de medidas utilizado en la antigua Mesopotamia.



Figura 12. Estatua de Gudea B con el plano

Se presenta entonces el dibujo como base fundamental de los jeroglíficos egipcios dando lugar al alfabeto fenicio, fuente del griego y del romano; los egipcios comenzaron a utilizar los papiros para trazar los planos de las pirámides y otros monumentos, encontrándose el primer símbolo de esta representación en el año 1650 antes de la era común. El papiro de Ahmes, de 33x548 cm, redacta una exposición de contenido geométrico que abarca 5 partes: la aritmética, la estereotomía, la geometría y el cálculo de pirámides, además, en este papiro se le llega a dar un valor aproximado al número pi (π) [10].

Por otro lado [9] argumenta la necesidad de transmitir la información y los conocimientos que había para la época, aquí nacen los primeros fundamentos de la ciencia geométrica que abarca cinco partes de la geometría como: la aritmética, la esteorotomía, la geometría y el cálculo de pirámides. La Figura 13, conocida como el papiro de Ahmes también o papiro matemático, es un documento de carácter didáctico y contiene diversos problemas matemáticos.



Figura 13. El papiro de Ahmes

Posteriormente, se dio la necesidad de estudiar las propiedades y las medidas de las figuras en el plano o en el espacio, comienza el estudio de la geometría en la época de los caldeos y de los egipcios, pero fue en Grecia donde se cultivó con empeño, se hicieron grandes descubrimientos y donde se obtuvieron resultados los cuales fueron coordinados para formar una verdadera doctrina en la cual se establecieron las bases de las proporciones (primera regla del diseño) [10].

[10] afirma que la primera prueba escrita de la aplicación del dibujo técnico y la utilización de planos previos a la ejecución de la obra tuvo lugar en el año 30 antes de la era común, cuando el arquitecto Romano Marco Lucio Vitruvius Pollione escribió un tratado sobre arquitectura que hasta hoy en día es el más antiguo que se conserva y del cual solo permanece el texto ya que se perdieron las ilustraciones originales. En este tratado, el autor dice que: *el arquitecto debe ser diestro con el lápiz y tener conocimiento del dibujo, de manera que pueda preparar con facilidad y rapidez los dibujos que se requieran para mostrar la apariencia de la obra que se proponga construir.*

Más adelante en la edad media era notable el estancamiento en cuanto a cultura y tecnología, ya que solo se visualizaban avances en los Monasterios; por otra parte, los gremios correspondientes acostumbraron a guardar secretos en cuanto a los dibujos que se habían utilizado, destruyéndolos luego de ser usados.

[10] afirma que en esta época el documento técnico más completo fue el Libro de Cantero, de Villard de Honnecourt, datado del siglo XIII, en el cual se recogen consejos sobre el arte de albañilería y labores de carpintería, así como esquemas geométricos para el encaje de las piedras. En el siglo XIV, el dibujo toma un papel protagónico en la construcción de catedrales y construcción de maquinaria, aparece la primera aproximación a la perspectiva central y seguidamente, en el siglo XV, la aparición de la imprenta.

En la edad media, la geometría tiene su desarrollo muy vinculado al álgebra y a la aritmética hasta la llegada de la geometría proyectiva y la geometría descriptiva, dando lugar a la geometría analítica. Los principales autores destacados de esta época son: Domnino de Larisa, Giotto di Bondone, Giovanni Cimabue, Pappus o Sereno de Antisa.

De manera similar [12] afirma que el documento técnico más completo de la Edad Media, fue el Libro del Cantero datado del siglo XIII de Villard de Honnecourt, donde se pueden encontrar consejos sobre el arte de albañilería y las labores de carpintería, así como esquemas geométricos para el encaje de las piedras. En ese mismo contexto en el libro se puede encontrar una ayuda válida para el gran arte de la construcción y de algunas instrucciones de carpintería y encontrar el arte del retrato y sus elementos tal como lo requiere y lo enseña el arte de la geometría [12]. En la Figura 13 se observa el libro de Cantero, que en su contenido tiene consejos del arte y la albañilería como se mencionó anteriormente.

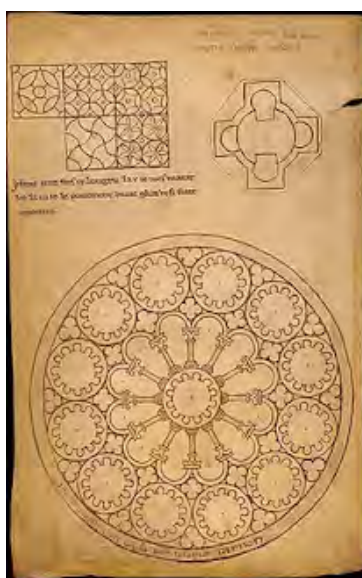


Figura 14. Libro del Cantero

[10] asegura, Posteriormente, los primeros instantes de la época del renacimiento se enfocaron en los avances de las ciencias experimentales y avanzadas, destacando al filósofo y matemático René Descartes quien introdujo el concepto de la geometría coordenada (coordenadas cartesianas), exponiendo los números algebraicos para resolver problemas de geometría. Asimismo, cabe destacar al matemático e ingeniero Gérard Desargues creador de la geometría proyectiva.

En el Renacimiento surge la perspectiva cónica, un sistema de representación gráfico basado en la proyección de un cuerpo tridimensional sobre un plano, mediante rectas proyectantes que pasan por un punto. Los primeros momentos del Renacimiento de occidente se caracterizaron por los avances en las ciencias experimentales y aplicadas. En lo referente a la perspectiva, la profundidad se indica a través de líneas oblicuas respecto a las horizontales y verticales del plano frontal, que sigue siendo el principal [12].

[10] dice, en relación con la perspectiva, que la profundidad se manifiesta con líneas oblicuas respecto a las horizontales y verticales del plano frontal, el cual sigue siendo el principal; las líneas paralelas de la realidad tan pronto aparecen como paralelas oblicuas (perspectiva caballera) o convergen en diversos puntos de fuga (perspectiva cónica o lineal). En la perspectiva cónica, se encuentra el tratado de Della Pictura Libri Tre el cual es un aporte importante ya que representa la primera formulación científica hecha por Leone Battista

Alberti.

En la Figura 15 se aprecia una perspectiva cónica y se puede distinguir porque utiliza solo un punto de fuga que coincide con el punto principal, en la parte inferior derecha podemos ver el modelo y en la inferior izquierda el punto de fuga, ya en la parte superior en la obra de Antonio Palomino las columnas direccionan el acceso al edificio.

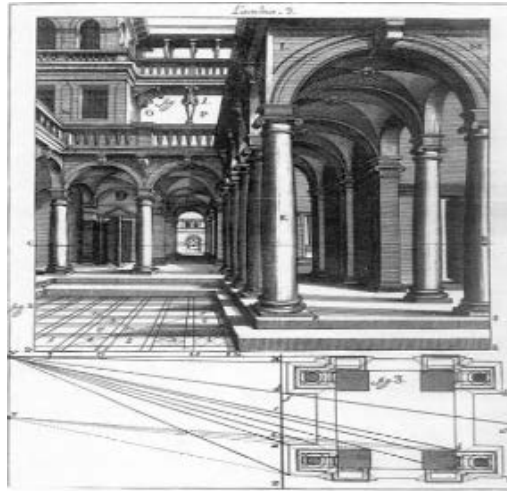


Figura 15. Perspectiva cónica obra de Antonio palomino 1655-1726

El posterior desarrollo de la técnica requirió aplicaran las teorías matemáticas a la práctica donde dio paso a la época moderna en esta época es cuando se produce el desarrollo real de los sistemas de representación más utilizados en ingeniería, como el sistema diédrico o de Monge más conocido como geometría descriptiva es el sistema de planos acotados o sistema acotado y el sistema axonométrico [12].

[10] afirma que ya en la época moderna, en 1769, Amédée François Frézier estableció fundamentos teóricos para la geometría, pero es en 1795, que Gaspard Monge se hace merecedor del reconocimiento como el creador de la geometría descriptiva, ciencia que se encarga de representar cuerpos mediante proyecciones. Introdujo el uso de las ecuaciones lineales en la geometría analítica de las tres dimensiones, completando el estudio de las superficies de segundo grado e introduciendo verdaderos progresos en las teorías de la geometría diferencial.

La Geometría Descriptiva puede definirse como un sistema gráfico y técnicas geométricas de carácter científico, que se ocupa de la representación en el plano y superficies geométricas, así como de formas espaciales tridimensionales sobre una superficie bidimensional, a las que se incorporan, fundamentalmente, condiciones posicionales [13]. En la Figura 16 se puede apreciar la aplicación del sistema acotado, se dio en las escuelas militares en el diseño de fortificaciones.

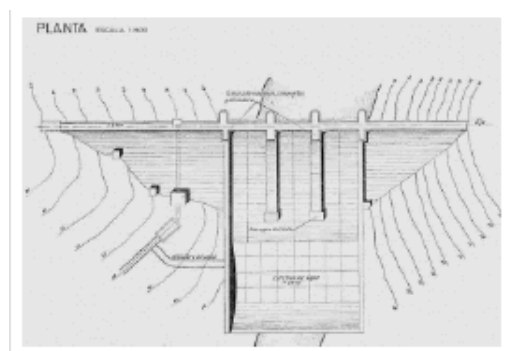


Figura 16. Aplicación del sistema acotado

El sistema axonométrico es un sistema de representación gráfica, consistente en representar elementos geométricos o volúmenes en un plano, mediante proyección paralela, referida a tres ejes ortogonales, de tal forma que conserven sus proporciones en cada una de las tres direcciones del espacio: altura, anchura y longitud.

Para [10] certifica los sistemas axonométricos proporcionan una visión clara e inmediata de la figura en el espacio, por lo que no se precisa tener conocimientos previos para imaginarla realmente. Fueron muy comunes en la Edad media y en el Renacimiento y recibieron su aportación científica a principios del siglo XIX con los estudios realizados por: un matemático inglés, profesor de la Universidad de Cambridge, llamado William Farishy por un matemático e ingeniero alemán, Catedrático en Freiberg, Julius Weisbach cuya obra fue publicada en 1857. En la Figura 17 vemos la aplicación de la perspectiva axonométrica isométrica despiezada con detalles.

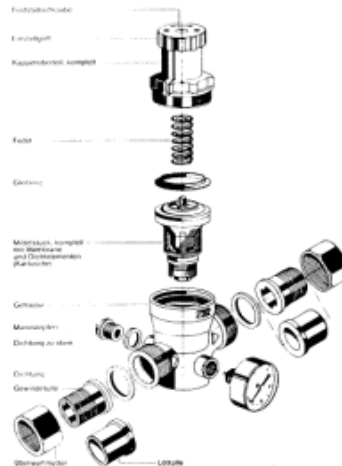


Figura 17. Aplicación del sistema axonométrico

Según [10] el punto de partida del CAD se dio en la década de los 80, el dibujo ingenieril esta soportado por las técnicas de Computer Aided Design CAD, cuyo principio estuvo respaldado por la tesis doctoral realizada por Ivan Sutherland en 1963 ante el MIT. De acuerdo con [10] Esta nueva plataforma significa el ahorro de tiempo y a su vez, la ganancia de eficacia y calidad ya que mejora la representación de los planos de proyecto. Esta tecnología dejó un lado la concepción tradicionalista del diseño con trabajos apoyados en formatos planos de papel normalizado y se incluía al ordenador en el proceso metodológico del mismo generando una notable reducción de costes y una optimización del proceso.

En paralelo [14] dice que AutoCAD contiene funciones que son capaces de facilitar el trabajo en equipo en cualquier lugar. Utiliza las nuevas aplicaciones web o móviles de AutoCAD. Los recursos de la herramienta incluyen una experiencia visual mejorada, comandos y operaciones de vista previa y herramientas para modelado 3D. De esa manera, su equipo puede concentrarse en los detalles y garantizar proyectos de mayor calidad.

3.2 Implementación del BIM

A continuación [10] presenta la situación actual de implantación del BIM en todo el mundo, enfocando en los principales países que ya han adoptado estrategias para que el uso de estos sistemas en la presentación de sus proyectos.

- *Finlandia:* Este país es actualmente el más avanzado en la implementación de la metodología BIM en el sector de la construcción. En Finlandia se requiere el uso del BIM desde el año 2007 con la presentación de cualquier proyecto en formato IFC, y tienen por objetivo llegar al Nivel 3 (Integrated BIM) durante los próximos años. La empresa estatal finlandesa The Senate Properties, creó las guías COBIM, predecesoras de las UBIM españolas.
- *España:* La asociación Building Smart Spanish Chapter, lanzó en 2014 la primera guía de protocolos BIM en español abierta a todos los profesionales interesados, la Guía uBIM, utilizando como referencia las guías COBIM finlandesa.

Es una serie de documentos con una iniciativa para la estandarización del BIM en el sector de la construcción de habla española, de gran utilidad para poder afrontar proyectos en este formato con los estándares de

trabajo requeridos y la elaboración efectiva de los mismos. En julio de 2015 el Ministerio de Fomento constituye la Comisión para la implantación de la metodología BIM en España. En ella se establecen las bases y la hoja de ruta para el uso obligatorio del BIM en licitaciones públicas tanto de edificación como de infraestructuras para el año 2018 y 2019 respectivamente.

3.3 Marco Legal

En Colombia aún no existe ninguna ley que exija la implementación de BIM para los proyectos. Sin embargo, se están empezando a solicitar en las licitaciones del Estado, pero la normatividad exigida para el desarrollo no se ha definido completamente. Por esa razón se crean entidades, gremios, incluso organizaciones ya establecidas como Camacol, la Sociedad Colombiana de Arquitectos y recientemente un Clúster BIM que buscan unificar un lenguaje, la Cámara de Comercio también lanzó un Clúster de Construcción en el año 2017 donde se espera que este tema sea de vital importancia.

4. MÉTODO

El tipo de investigación es de carácter descriptivo, ya que inicialmente se enfocó en la definición de las características que identifican y delimitan los diferentes elementos y componentes de la metodología BIM y su interrelación. También se considera de tipo exploratoria porque busca obtener insumos en cuanto a cuáles son los programas que usualmente utilizan los estudiantes de arquitectura de la FUP en la realización de sus proyectos arquitectónicos y cómo consideran su experiencia posterior al uso del software BIM Revit.

La metodología utilizada en el proyecto es, La investigación cualitativa de tipo descriptivo, analítico y crítico, la cual consiste en reconocer que programas están utilizando los estudiantes para la representación de proyectos arquitectónicos, saber si conocen la metodología BIM asimismo saber si la utilizan en sus proyectos. Esta no solo se limita a recolectar datos, sino; a identificar objetivamente las causas para ser analizadas y mediante los resultados que se obtengan contribuir a encontrar soluciones.

QR es un código de barras bidimensional cuadrada que puede almacenar los datos codificados. La mayoría del tiempo los datos es un enlace a un sitio web (URL), que permitirá la recolección de la información en tiempo real de las personas consultadas, se utilizó una herramienta digital en línea llamada Google Forms que permite realizar encuestas a través del correo electrónico de Gmail, aplicaciones de Google, formularios.

Las fuentes de información a consultar son secundarias; por medio de la información de primera mano, la cual se complementa con entrevistas, entre otros; e información primaria que se refiere a información sintetizada, reorganizada o reelaborada como la encontrada en libros, documentos, revistas, enciclopedias.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizó encuestas a estudiantes de la Facultad de Arquitectura e Ingenierías de la Fundación Universitaria de Popayán en el ciclo profesional de 4, 5 y 6 semestre y al ciclo profundización de 7, 8 y 9 semestre.

5.1 Resultados encuestas ciclo profesional

Las encuestas realizadas van a permitir saber que programas están utilizando para la representación de proyectos arquitectónicos, además saber si tienen conocimiento de la metodología BIM y si les gustaría profundizar en ella por medio del software Revit.

La encuesta se realizó a 73 estudiantes de la facultad de arquitectura e ingenierías de la fundación universitaria Popayán en el ciclo profesional 4, 5 y 6 semestre. Se utilizó una herramienta digital en línea llamada Google Forms que permite realizar encuestas a través del correo electrónico de Gmail, aplicaciones de Google, formularios. A la pregunta: qué programas utilizas para la ejecución de sus proyectos 2d, el software más utilizado es AutoCAD (Figura 18) con 72 selecciones de las 73 personas equivalente al 98,6%.

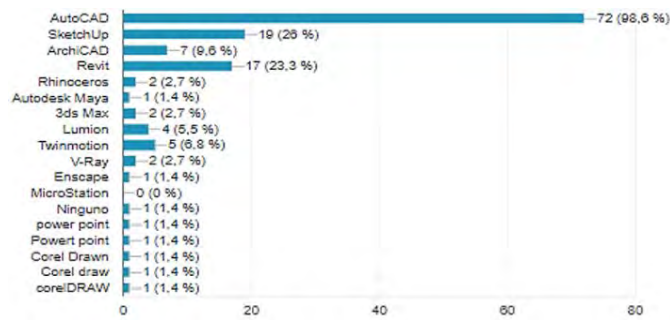


Figura 18. Pregunta 4 de la encuesta

A la pregunta: qué programas utilizas para el modelado 3d de sus proyectos arquitectónicos, el software más utilizado es Skechup (Figura 19) con 56 respuestas seleccionadas de 73 estudiantes que respondieron la encuesta equivalente al 76,7%.

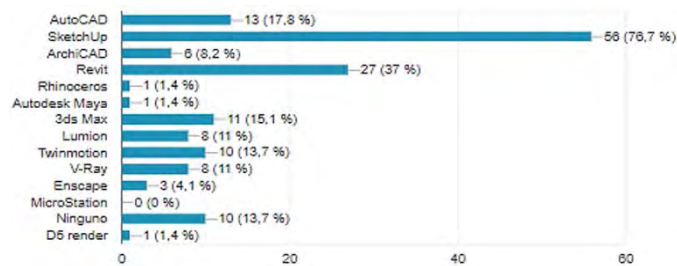


Figura 19. Pregunta 5 de la encuesta

A la pregunta: qué programa utilizas para el renderizado los programas más utilizados, Twinmotion y V-ray cuentan con 21 selecciones equivalente al 28,8% (Figura 20).

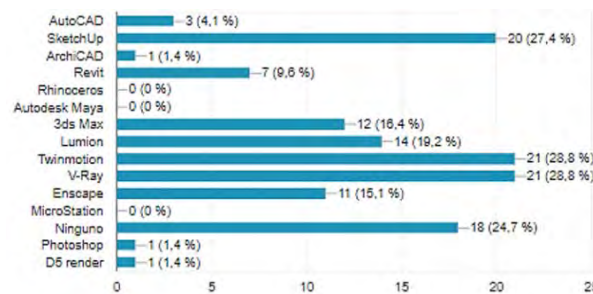


Figura 20. Pregunta 6 de la encuesta

A la pregunta si han recibido información de la Metodología BIM, 44 estudiantes respondieron que no, equivalente al 60,3% y 29 estudiantes respondieron que sí, equivalente al 39,7%.

A la pregunta: consideras pertinente que el programa Arquitectura realice un taller de refuerzo para profundizar en la metodología BIM por medio de software Revit, 4 estudiantes respondieron que no, equivalente al 5,5% y 69 estudiantes dijeron que sí, equivalente al 94,5%.

5.2 Resultados encuestas ciclo profundización

Las encuestas realizadas van a permitir saber si están aplicando la metodología BIM software Revit en la realización de sus proyectos arquitectónicos y saber que programas están utilizando para la representación de los proyectos. La encuesta se realizó a 42 estudiantes de la facultad de arquitectura e ingenierías de la fundación universitaria Popayán en el ciclo profundización 7, 8 y 9 semestre. Se utilizó una herramienta digital en línea llamada Google Forms que permite realizar encuestas a través del correo electrónico de Gmail, aplicaciones de Google, formularios.

A la pregunta: qué programas utilizas para la ejecución de sus proyectos 2d, el software más utilizado es AutoCAD con 40 selecciones de las 42 personas equivalente al 95,2% (Figura 21).

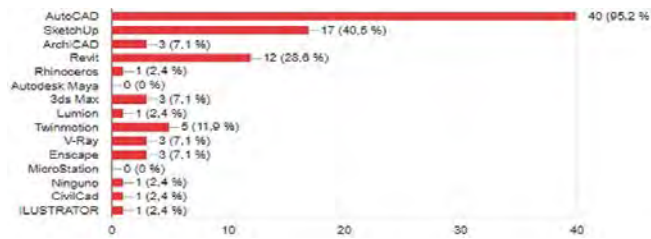


Figura 21. Pregunta 4 de la encuesta

A la pregunta: qué programas utilizas para el modelado 3d de sus proyectos arquitectónicos, el software más utilizado es Skechup con 39 respuestas seleccionadas de 42 estudiantes que respondieron la encuesta equivalente al 92,9% (Figura 22).

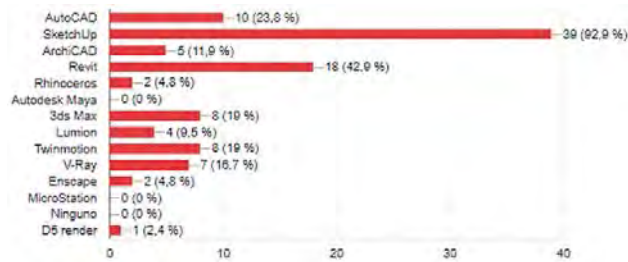


Figura 22. Pregunta 5 de la encuesta

A la pregunta: qué programa utilizas para el renderizado, el programa más utilizado es Twinmotion con 27 selecciones equivalente al 64,3% (Figura 23).

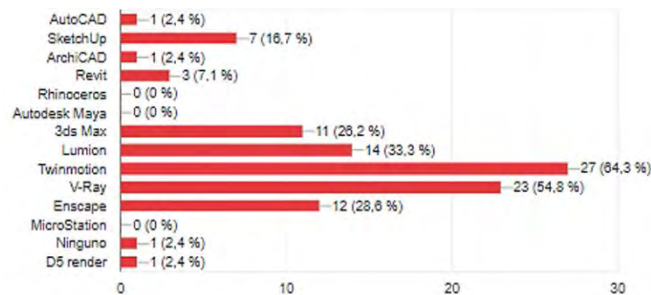


Figura 23. pregunta 6 de la encuesta

A la pregunta: dentro de la metodología BIM qué programas manejas, 23 estudiantes manejan Revit equivalente al 54,8% (Figura 24).

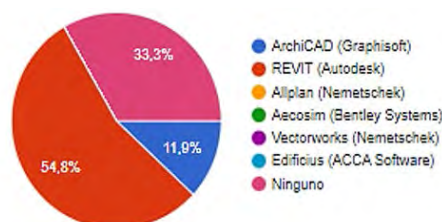


Figura 24. Pregunta 8 de la encuesta

A la pregunta: utilizas Revit dentro de tus proyectos arquitectónicos, 13 estudiantes seleccionaron que sí equivalente a 31% y 29 seleccionaron que no equivalente al 69%. Mientras que a la pregunta: estarías dispuesto a ampliar su conocimiento en la metodología BIM por medio de software Revit, 40 estudiantes seleccionaron que sí equivalente al 95,2% y 2 seleccionaron que no equivalente al 4,8%.

5.3 Guía multimedia

Guía multimedia (Figura 25) como material de apoyo para la utilización del software BIM-Revit, cabe resaltar que se integraron softwares como AutoCAD y 3ds Max para darle un mayor uso a esta guía, además que se pueden integrar más softwares y se puede estar retroalimentando.



Figura 25. Guía multimedia

6. CONCLUSIONES

Un aporte desarrollado en el proyecto fue el uso del software Revit metodología BIM que en efecto mejoro la representación gráfica de proyectos arquitectónicos en facultad de arquitectura e ingenierías fundación universitaria de Popayán. Además, se realizó un análisis de los programas más implementados en la industria BIM en el mundo y en Colombia, Revit es el Software más utilizado porque se involucra con la parte técnica. Por ello es de gran importancia resaltar este tipo de proyectos, puesto que se desarrollan y se ajustan de acuerdo a las competencias laborales, volviendo así a los profesionales en pregrado más competitivos.

Podemos concluir que, gracias a las encuestas y al trabajo realizado con los estudiantes del programa Arquitectura, la necesidad de implementar la metodología BIM software Revit en la representación de proyectos arquitectónicos, lo cual permitirá mejorar los procesos y de esta manera optimizar y ejecutar de una manera eficiente e integral el proyecto arquitectónico que estén desarrollando.

A modo de cierre se implementó la metodología BIM en la representación de proyectos arquitectónicos, como estamos en la era digital, se capacitó a estudiantes del programa arquitectura para que tengan habilidades BIM y de esta manera posean competencias tecnológicas en el mercado laboral, ya que están solicitando personas técnicas con conocimiento de BIM especialmente que puedan modelar y utilizar software como Revit.

Finalmente, el mayor aporte que dejara esta investigación es la guía multimedia como material de apoyo para la utilización del software BIM-Revit, para que los estudiantes la utilicen en la representación de proyectos arquitectónicos donde contiene toda la información de los comandos y video tutoriales. Asimismo, será subida a una plataforma institucional de fácil acceso.

REFERENCIAS

- [1] BuildingSMART. (2020). BIM en español. Recuperado: <http://www.buildingsmart.es/>
- [2] Building Information Modeling. (2021). ¿Qué es BIM? Recuperado: <https://www.autodesk.es/solutions/bim>
- [3] BIMObject. (2020). Qué es BIM. BIMObject for Business.
- [4] BibLus. (2018). Las dimensiones del BIM: 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D, 10D. BibLus.
- [5] DataLaing. (2019). Las 7 Dimensiones del BIM Propuesta de 3 Dimensiones Adicionales (8D, 9D Y 10D). DataLaing.
- [6] Robertsonatale. (2020). Formato IFC y Open BIM, todo lo que hay que saber. BibLus.
- [7] BIMnD. (2019). ¿Qué es el 4D en BIM? BIMnD.
- [8] BIMnD. (2019). ¿Qué es el 6D en BIM? BIMnD.
- [9] Navarro A. (2012). La documentación de ingeniería y las nuevas tecnologías de la información. Engineering Records and New Information Technologies.
- [10] Docplayer. (2020). Implementación de la metodología BIM para elaborar proyectos mediante el software Revit. Recuperado: <https://docplayer.es/108246535-Implementacion-de-la-metodologia-bim-para-elaborar-proyectos-mediante-el-software-revit.html>
- [11] Carvajal G. (2020). El templo dentro de la estatua dentro del templo que sirvió para reconstruir la metrología acado-sumeria. La Brújula Verde.
- [12] PDF Free. (2021). Revisión histórica: Desde el dibujo en ingeniería hacia la ingeniería del diseño Recuperado: <https://docplayer.es/33109720-Revision-historica-desde-el-dibujo-en-ingenieria-hacia-la-ingenieria-del-diseno.html>

- [13] Vargas J. (2016). Análisis de los contenidos y el método didáctico de la asignatura de geometría descriptiva desde su perspectiva histórica. Universidad de Granada.
- [14] Buysoft Colombia. (2020). AutoCAD. Recuperado: https://buysoft.com.co/productos/autodesk-autocad/?gclid=CjwKCAjw6raYBhB7EiwABge5KiNf0EI_QjdJM-PnfAbHWGoCh7uWte3eARwXD-aGkrVI6TzbEL6WRRoCv-kQAvD_BwE

Utilización de métricas de calidad para evaluar las características de uso de un producto software

Maribel Romero Mestre¹
Edwin Manuel Vides Hernández²
Universidad Popular del Cesar
Colombia

En este capítulo se propone un modelo de medición para evaluar la calidad en uso de un producto software, aplicando métricas para evaluar cada una de las características de uso del producto. La evaluación busca determinar el nivel de calidad del producto en cuanto a las características más relevantes para los usuarios, tales como eficiencia, claridad, operatividad, efectividad y utilidad. Se utilizó una metodología que estructura los pasos para la evaluación de la calidad: identificación de las características de calidad, recolección de datos de medida, cálculo de las métricas y evaluación de resultados. La investigación fue de tipo descriptiva, de enfoque cualitativo-cuantitativo. Como técnica de recopilación de datos se utilizó la encuesta y un cuestionario como instrumento para medir el grado de usabilidad. El diseño de las métricas e indicadores empleados en el caso de estudio constituye uno de los aportes significativos de la investigación. También se presentan los resultados obtenidos en el caso de estudio, aplicado al software de una Institución prestadora de servicios de salud, que demuestran que es posible medir la calidad en uso de un producto software.

¹ Ingeniera de Sistemas, Especialista en Sistemas de Información y Magíster en Ingeniería de Sistemas y Computación.

Contacto: maribelromero@unicesar.edu.co

² Ingeniero de Sistemas.

Contacto: emvides@unicesar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente los productos de software se han convertido en herramientas estratégicas para el cumplimiento de los objetivos en las organizaciones. Por tanto, el tema de la calidad del software es de gran importancia para los usuarios, al exigir productos que cumplan con sus necesidades [1]. La calidad del producto software se basa en precisar y valorar el grado en que dicho producto, cumple con los diferentes criterios asociados al producto y satisface los requisitos de los usuarios, aportando valor a la actividad realizada. El propósito, es que el software cumpla con todos los requisitos planteados, que sea amigable, seguro, útil, usable, estable, para que el usuario se sienta satisfecho con su uso [2].

Dentro de las características de calidad de un producto de software se encuentra la calidad en uso, la cual establece el nivel en que un producto de software es empleado por los diferentes usuarios con el fin de suplir las necesidades que estos presentan, además, de comprobar que software da cumplimiento a los requerimientos establecidos previamente a partir de factores de calidad como son; la eficiencia, eficacia, seguridad, satisfacción y flexibilidad [1].

El objetivo primordial de esta investigación es evaluar las características de calidad en uso y usabilidad de un producto de software, a través de métricas de medición. Para realizar la evaluación de la calidad en uso se desarrollan las actividades propuestas por la familia del estándar ISO/IEC 25000, tomando los criterios del estándar ISO 25010, que describe el modelo de calidad para el producto software y para la calidad en uso. Además, el estándar ISO 25022, que define específicamente las métricas para realizar la medición de la calidad en uso del producto y el estándar ISO 25023 que especifica las métricas para realizar la medición de la calidad de productos y sistemas software [2].

Es de gran importancia de evaluar la calidad de un producto de software, porque a través de esta se mide el grado de desempeño de las principales características con las que debe cumplir un producto de software durante su desarrollo, estas características garantizan que el cliente cuente con un sistema confiable, que genere un grado de satisfacción frente a la funcionalidad y eficiencia del producto construido [3]. Por otro lado, la calidad de software es definida como el método efectivo del producto de software que es puesto en práctica en la creación de un producto útil que proporciona valor cuantificable en la medida que es generado y usado [4].

Por otra parte, la calidad en uso es descrita como el nivel en que un producto de software es empleado por los diferentes usuarios con el fin de suplir las necesidades que estos presentan, además de comprobar que el software da cumplimiento a los requerimientos establecidos previamente a partir de factores de calidad como; la eficiencia, eficacia, seguridad, satisfacción, y flexibilidad [1]. Por su parte, el estándar ISO 25010 define la calidad en uso, como la perspectiva que el usuario percibe de la calidad del producto software cuando este es usado en un ambiente específico y en un contexto de uso específico.

Teniendo en cuenta que su medición radica en impulsar la obtención de los objetivos de los usuarios en un entorno determinado, en donde se denotaría variabilidad en base al tipo de usuario y los requerimientos específicos de cada uno de ellos, en lugar de enfocarse a la valoración particular de los componentes propios del software [5].

2. MARCO CONCEPTUAL

Para evaluar la calidad del software se cuenta con modelos de calidad que a través de la descomposición en características y sub características relacionadas, muestran una evaluación objetiva de la calidad. Se tienen diversos modelos de calidad, que están orientados al software de uso general y a la evaluación sobre el producto final.

Entre estos se encuentra el estándar ISO/IEC 25000 que está basado en la integración de los modelos del estándar ISO/IEC 9126 y el estándar ISO/IEC 14598, que contienen aspectos de calidad para la evaluación de un producto de software [5]. En la actualidad, la norma ISO 25000 se distribuye en 5 estándares los cuales se aprecian en la Figura 1.



Figura 1. Distribución de la norma ISO/IEC 25000 [6]

Las normas de la ISO /IEC 2501n presentan modelos de calidad detallados, incluyendo características para calidad interna, externa y en uso del producto software.

2.1 ISO/IEC 25010 - Modelos de calidad de software y sistemas

Describe el modelo de calidad para el producto de software y para la calidad en uso. Esta norma presenta las características y sub características de calidad frente a las cuales se debe evaluar el producto software. Este estándar desglosa el nivel de calidad del producto de software en tres perspectivas diferentes (Interna, externa y en uso) [7], determinado como factores de calidad; la adecuación funcional, eficiencia de desempeño, compatibilidad, capacidad de uso, fiabilidad, seguridad, mantenibilidad y portabilidad [8].

Este modelo se caracteriza por definir a la evaluación de calidad del producto con base en tres aspectos diferentes según sea el nivel de ejecución, siendo el primer aspecto el modelo de calidad en uso, enfocado a los usuarios a los cuales se dirige el desarrollo del producto de software. Posteriormente se encuentra el modelo de calidad del producto, establecido sobre los mismos desarrolladores del software. y finalmente se conoce el modelo de calidad de los datos [9]. Así mismo sobre el modelo de calidad del software se determinan un total de ocho características de calidad siendo estas: adecuación funcional, eficiencia de desempeño, compatibilidad, usabilidad, fiabilidad, seguridad, mantenibilidad, portabilidad [10].

2.2 ISO/IEC 25012 – Modelo de calidad de datos

Define un modelo general para la calidad de los datos, aplicable a aquellos que se encuentran almacenados de manera estructurada y forman parte de un Sistema de Información. La norma ISO /IEC 2502n establece un modelo de referencia para la medición de la calidad del producto de software, con las distintas definiciones de medidas de calidad (Interna, Externa, Uso) y guías prácticas para su aplicación. Entre las divisiones de esta norma se encuentran las relacionadas con la calidad del uso y del producto:

- ISO / IEC 25022 – Medición de la calidad en uso: Define específicamente las métricas para realizar la medición de la calidad en uso del producto del software la cual se encuentra conformada por los criterios de efectividad, eficiencia, satisfacción, libertad de riesgo, y cobertura de contexto [2].
- ISO / IEC 25023 – Medición del sistema y calidad del producto de software: determina las medidas de calidad para estimar de manera cuantitativa la calidad del sistema y del producto del software con base en el estándar ISO / IEC 25010 a partir de las características y sub características planteadas [11].

3. MARCO REFERENCIAL

La investigación realizada por [12] consistió en identificar el nivel de calidad con el cual el software de gestión de historias clínicas asiste a los usuarios (enfermeras, médicos, cajeros, entre otros) en la ejecución de sus actividades laborales. Las actividades propuestas en el trabajo se realizaron a partir de del estándar ISO/IEC 25040 y las métricas de calidad planteadas en el ISO/IEC 25022, ambos integrantes de la familia ISO/IEC 25000 enfocada a la evaluación de calidad del producto de software. Como instrumento de desarrollo, se aplicó una encuesta de satisfacción de los usuarios con base en los parámetros establecidos por la métrica de satisfacción tomando como casos prácticos en un hospital de índole privado y dos hospitales públicos. Como resultados de la evaluación, se determinó que el hospital privado posee un nivel

muy satisfactorio de calidad en comparación a los públicos, así mismo, la dispersión de los datos fue muy baja, lo que manifiesta una percepción en común de la calidad en uso entre todos los usuarios.

Por otra parte, en [1] se desarrolla la investigación referente al análisis de la usabilidad del sistema de trámite documentario SISTRAM, respecto a la satisfacción del usuario basado en la norma ISO/IEC 25000 de la dirección regional sectorial de educación. Teniendo como propósito fundamental realizar la evaluación de usabilidad del software en función al grado de satisfacción del usuario, con el fin de aplicar los planes de optimización necesarios con base en los resultados de la investigación.

Como metodología práctica se analizó e implemento la norma ISO/IEC 25000, estableciendo cuatro factores esenciales en la medición de la satisfacción del usuario, siendo estos: la consecución de objetos, la confianza, el placer y, por último, el confort, Como resultado se determinó que el software presento un grado de satisfacción del 51% con base en la interacción hombre-software, siendo el apropiado para el caso de estudio, pero puede presentar una tendencia hacia la insatisfacción que podría ser causada por diversos eventos tanto a nivel interno como externo a la empresa.

El propósito de [2] fue realizar una evaluación de calidad en el uso al sistema de información de apoyo a la gestión de la institución educativa SIAGIE. Como instrumento de medición se utilizó la ISO/IEC 25000 en conjunto a los factores y criterio más relevantes para el usuario, encargados de establecer el nivel de calidad en uso de un sistema de información. Como resultados se obtuvieron una serie de datos que determinaron la relevancia de los factores de calidad, además, de los criterios y métricas con base en el nivel de importancia; asociados a cada factor específicamente, en donde se concluyó que un grado de insatisfacción de parte del usuario en algunos aspectos de evaluación fue debido al tiempo de realización de las tareas o actividades laborales causado por el grado de desconocimiento o restricciones que se presenta en relación al producto de software.

En [7] se evalúa de la calidad del software con base en el estándar ISO/IEC 25010, el método de investigación se sustentó en cuatro fases del desarrollo las cuales consistieron en; planeación, elaboración, construcción y cierre. Así mismo, entre las técnicas de recolección de la información se utilizaron fueron; diagramas de Pareto, diagramas de causa y efecto, encuestas de respuesta abierta, entre otros. Como resultado de evaluación se estableció que de acorde con el planteamiento del problema. La organización contó con un archivo en donde se registró un número considerable de incidentes y aspectos a tener en cuenta para el grupo nombrado *Gestión de sistemas de información*, a partir del cual surgen una serie de peticiones de cambio orientadas a las funcionalidades que presenta el sistema, demostrando así debilidades en el proceso de pruebas y efectuando con base en esto las respectivas recomendaciones.

La investigación planteada por [13] tiene la finalidad de desarrollar una evaluación de usabilidad en los sitios web que permita la detección de problemas que dificulten al usuario alcanzar sus objetivos, apoyar el proceso de mejora, optimizar las actividades laborales, entre otros. La metodología aplicada en el desarrollo de la investigación se fundamentó en la evaluación heurística, test de usuarios y la definición de la métrica de usabilidad, buscando con esto la valoración de factores de accesibilidad como la eficacia, eficiencia, estética, entre otros. Como resultado se logró el desarrollo de un sistema de evaluación concreto y eficiente basado en la heurística incorporando aspectos como la medición de elementos de acuerdo a su nivel de importancia, destacando que el usuario colombiano opta por un sitio con un diseño agradable, ubicación idónea de elementos de interfaz, búsqueda de información idónea, entre otros.

4. MÉTODO

El método de investigación utilizado fue el descriptivo, centrándose en la recolección de información de diferentes fuentes (tesis, artículos, normas etc.), para analizar los aspectos referentes sobre la calidad en uso de un producto de software. Además, se utilizó el método cuantitativo, para realizar el análisis de los datos de muestra que describen el proceso de la evaluación de la calidad en uso del producto de software. El procedimiento utilizado en el desarrollo de la investigación fue el levantamiento de la información, con el análisis de la situación actual de la evaluación de la calidad del producto de software, a través de la recolección de datos y el análisis de los resultados.

La metodología que se siguió consta de cuatro etapas: Primera, Determinar las características de la calidad en uso y de usabilidad propuestas por el estándar ISO/IEC 25000 y sus denominaciones. Segunda, Selección de criterios, características, sub características de evaluación de la calidad en uso y asignación de la escala de valoración para cada atributo. Tercera, Diseño y ejecución de la evaluación de la calidad del software.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Etapa 1. Determinación de las características de calidad en uso a evaluar

Para aplicar la evaluación de la calidad en uso se tomó como referencia el sistema de información de la institución prestadora de salud Medydon IPS, siendo esta una institución médica de primer nivel radicada en el departamento del Cesar, Colombia, encargada de prestar servicios de salud, entre los cuales: hospitalización, laboratorio clínico, transporte asistencial, consulta externa y urgencias las 24 horas.

Por otro lado, se procedió a identificar las funcionalidades del sistema de información R-FAST 8.7 Cloud, el cual es un software que integra las operaciones administrativas, financieras y asistenciales de la institución, desarrollado con el objetivo de apoyar todos los procesos misionales y asistenciales de los prestadores de servicios de salud, ya sean, de índole pública o privada, a partir de componentes como facturación hospitalaria, facturación electrónica, inventarios, y demás. Así mismo, el sistema de información integra todos los procesos administrativos y financieros para asegurar el control total de la operación del negocio, garantizando información segura, confiable y en tiempo real [14].

La institución requiere de un sistema que sea confiable, ágil, veraz y seguro, además, que proporcione fácil manejo a los usuarios de la entidad (administrativos, médicos, pacientes, etc.), lo que implica un registro rápido y oportuno de los datos. Por tanto, hay aspectos relevantes a medir para este tipo de software como son la efectividad, eficiencia y utilidad del sistema.

5.2 Etapa 2. Selección de criterios, características, sub características de evaluación de la calidad en uso y asignación de la escala de valoración para cada atributo

5.2.1 Selección de factores de calidad

Para determinar los criterios de la calidad en uso, se tomó como referencia los modelos conceptualizados en el estándar ISO 25000. Se utilizó el modelo de calidad ISO 25010, donde se detallan las particularidades de la calidad en uso, seleccionando las características de efectividad, eficiencia y utilidad. Asimismo, las sub características a medir fueron efectividad, eficiencia y satisfacción, respectivamente. Además, se utilizó las métricas especificadas en la ISO 25022 y la ISO 25023. En la Tabla 1, se presentan los factores de calidad seleccionados.

Tabla 1. Factor de calidad en uso

	Factor de Calidad	Descripción
Calidad en uso	Efectividad	Se define como la capacidad del producto de software para lograr los objetivos o las peticiones del usuario en el momento de usar el sistema
	Eficiencia	Refiere a la habilidad que posee el producto de software suministrando ayuda al usuario en la consecución de los objetivos del mismo, usando de forma mínima los recursos disponibles.
	Utilidad	Indica el grado de satisfacción en que se encuentra el usuario cuando alcanza los objetivos preestablecidos.

5.2.2 Determinación de los criterios y métricas de calidad

Una vez establecidos los factores de calidad y analizados los procesos realizados en la IPS, se determinan los criterios de calidad de efectividad, eficiencia y satisfacción. se identificaron las métricas a través de las cuales se realizó la estimación de calidad del sistema en función de los factores y criterios específicamente, siendo estos: completitud de la tarea, incidencia de fallos, eficiencia de la tarea, grado de satisfacción,

porcentaje de inconformidad y discreción funcional, así como su valor deseado, el cual indica el nivel de cumplimiento para cada una; siendo estos visualizados en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores, Criterios y Medidas de calidad

	Factor de Calidad	Criterio de calidad	Medida	Valor Deseado
Calidad en uso	Efectividad	Efectividad	Compleitud de la tarea	1
			Incidencia de fallos	1
	Eficiencia	Eficiencia	Eficiencia de la tarea	1
			Grado de satisfacción	1
Utilidad	Satisfacción	Porcentaje de inconformidad	0	
		Discreción funcional	1	

5.2.3 Escala de valor de aplicable en la evaluación de calidad

En esta parte se diseña la escala de la evaluación de la calidad, como se especifica en la Tabla 3, donde se propone un rango de medición, adaptados a los criterios dados para mejorar el sistema de información de la entidad. Los valores están comprendidos entre 1 y 5, consolidados en cinco niveles de puntuación y tres grados de satisfacción.

Tabla 3. Escala de decisión y niveles de satisfacción

Puntaje criterio	Puntuación de calidad	Grado de Satisfacción
1-1,9	Deficiente	Insatisfactorio
2 -2,9	Insuficiente	Poco satisfactorio
3 - 3,9	Aceptable	Normal
4 -4,9	Sobresaliente	Satisfactorio
5	Excelente	Muy Satisfactorio

5.3 Etapa 3. Diseño y ejecución de la evaluación de la calidad del software

5.3.1 Evaluación de la calidad en uso del sistema

Para evaluar la calidad del sistema se aplicaron las métricas correspondientes a los factores de la efectividad, eficiencia y utilidad. Tomando en consideración que los valores deseados para todas las métricas radican en un rango entre cero 0 y 1, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Aplicación de criterios de decisión y niveles de satisfacción

Factor de Calidad	Criterio de calidad	Medida	Valor deseado	Resultado Medida	Puntaje criterio	Resultado Factor
Efectividad	Efectividad	Compleitud de la tarea	1	1	5	5
		Incidencia de fallos	0	0,12	5	
Eficiencia	Eficiencia	Eficiencia de la tarea	1	0,6	4	4
		Grado de satisfacción	1	0,16	1	
Utilidad	Satisfacción	Porcentaje de inconformidad	0	0	5	3,7
		Discreción funcional	1	0,93	5	

Se encontró que, en el criterio de *efectividad*, para la métrica de completitud de tarea, se empleó una escala de medición de cero a uno, precisando a el valor más cercano a uno (1) como el más óptimo; asignándole un puntaje de cinco (5) a este criterio. El resultado que se obtuvo al realizar la medición de la completitud de la tarea fue de 1, siendo muy satisfactorio. Lo que demuestra un manejo apropiado de las tareas desarrolladas al interior de la empresa.

Por otra parte, para establecer el resultado correspondiente a la métrica de *incidencia de fallos* se estableció una relación inversamente proporcional, precisando el valor más cercano a cero (0) el más óptimo, debido a que a medida que aumenta la efectividad de la tarea, disminuye la incidencia de fallos referente a las mismas, por lo cual se determina un puntaje de cinco (5). La medida obtenida para este criterio fue de 0.12, siendo un resultado satisfactorio, a raíz de un menor número de fallos en función a las tareas evaluadas hacia el personal de la entidad.

Para el criterio de *eficiencia* se estableció el valor resultante el más cercano a uno (1) como el valor más óptimo. Para validar este factor se evaluaron requerimientos como: registros de pacientes, historias clínicas, entradas y salidas de los pacientes, traslados, registros de laboratorios clínicos entre otros, en donde se determinó que en un tiempo estimado de 20 minutos en promedio son realizadas 12 tareas, lo cual, una vez aplicada la métrica, se estableció un resultado de 0,6, recibiendo un criterio de valoración de 4, lo que significa que es satisfactorio.

Para el criterio de *satisfacción*, las métricas correspondientes a la discreción funcional, y el grado de satisfacción se precisó el valor resultante más cercano a uno (1), como el valor más óptimo, en contraste se estableció que para la métrica referente al porcentaje de quejas el valor más cercano a cero (0) como el mejor.

Para el cálculo de la métrica referente al grado de satisfacción se recabaron los datos a partir de la aplicación de una encuesta, con una muestra de siete usuarios y su relación con el sistema, el cual constó de 19 ítems categorizados, con el fin de determinar aspectos de satisfacción como: manejo de la aplicación, soporte de ayuda, la interactividad, la presentación, el contenido y finalmente el funcionamiento. Las opciones de respuesta se desglosaron en; nada satisfecho, poco satisfecho, normal, satisfecho, y muy satisfecho respectivamente. Así mismo, se logró establecer una relación en promedio de 3 ítems con respuesta satisfactoria de los 19 con que contaba la encuesta, obteniendo un resultado del 0.16, estableciendo un criterio de valoración de nivel deficiente (1); causado por falencias presentadas en el sistema, como el cierre no autorizado del mismo, inconformidad en la transición entre los módulos que lo componen, falta de funcionalidades relevantes en la labor del personal especializado.

En la métrica correspondiente al porcentaje de inconformidad, y con base en la muestra seleccionada, no fue posible recoger ninguna queja respecto a la interacción de los mismos con el sistema de información, estableciendo un resultado de 0/0, y, dictaminando un puntaje de valoración de cinco (5) reflejado en el cumplimiento del sistema para las actividades de la entidad, más sin embargo fue posible captar perspectivas de mejoramiento del mismo con base en el almacenamiento de recursos, optimización del diseño estético, parametrización del sistema, y demás.

Para el cálculo de la métrica de la discreción funcional, y a partir de la muestra indicada, se toma como método de evaluación la observación, se percibe el uso de 38 de las 41 funciones que incorpora el sistema, estableciendo un resultado de 0,93, recibiendo una valoración de cinco (5) lo cual denota un uso considerable de los recursos ofrecidos a nivel de software.

Una vez culminada la estimación de los factores y criterios que componen la calidad en uso del sistema de información, se procede con la valoración a nivel general, arrojando como resultado un valor de 4.23, generando una puntuación de calidad de sobresaliente y un grado de satisfacción satisfactorio, como se expone en la Tabla 5.

Tabla 5. Valuación de la calidad en uso

Aspecto de Calidad	Resultado	Puntuación de calidad	Grado de satisfacción
USO	4.23	Sobresaliente	Satisfactorio

5.4 Etapa 4 Análisis de resultados de evaluación

Una vez obtenido los resultados de la aplicación del modelo de medición propuesto el cual enmarca a los factores de calidad tales como efectividad, eficiencia, y utilidad, como se visualizaron en la Tabla 4, se realizará el análisis de incidencia de cada factor en la IPS, teniendo en cuenta los resultados que se visualizan en la Figura 2.

Analizando los resultados arrojados por cada factor de calidad, se encuentra que una vez aplicadas las mediciones el factor de la efectividad, se obtiene un resultado de 5, establecido como *excelente* y *muy satisfactorio*. Resultado que se denota por un adecuado grado de completitud en las tareas o actividades llevadas a cabo por el personal en el sistema de información implementado al interior de la entidad

prestadora del servicio. Así mismo se logra reflejar un bajo índice de errores cometidos por los usuarios, caracterizados por las constantes jornadas de capacitación que reciben los mismos por parte del personal de desarrollo del producto del software, en donde se tratan temas como las nuevas políticas referente al uso del sistema, los cambios que trae consigo las optimizaciones del producto, entre otros, determinando a este factor con un nivel de incidencia *Excelente* correspondiente a un porcentaje del 39,37% sobre la calidad en uso del sistema de información.

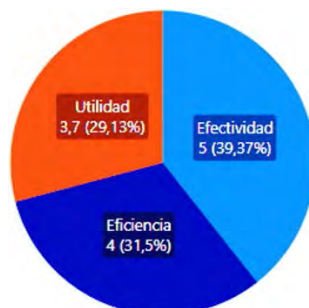


Figura 2. Incidencia de los factores de la calidad en uso

Para el factor correspondiente a la eficiencia, refleja un resultado de 4, determinado por un nivel notable de planteamiento, desarrollo y culminación de las distintas actividades realizadas por los usuarios y su interacción con el sistema en relación a un periodo de tiempo determinado, identificado entre las actividades casos como registros, consultas, informes, traslados, autorizaciones y demás. Por este motivo, es posible denotar una incidencia o nivel de impacto *Sobresaliente* de la eficiencia con un 31,5% para la calidad en uso en el sistema de información.

Por otro lado, al interior de la calidad en uso, se enmarca el factor de la utilidad con una valoración del 3,7, caracterizado por criterios tales como: grado de satisfacción, el porcentaje de inconformidad y la discreción funcional. Para medir de forma concisa y óptima la satisfacción percibida se implementó un instrumento para identificar el nivel o la magnitud de asistencia del producto de software implementado en la entidad prestadora de servicio, a partir de la valoración de aspectos como: el manejo, ayuda, la interactividad, la presentación, el contenido y finalmente el funcionamiento cuyos resultados son visualizados en la Figura 3.

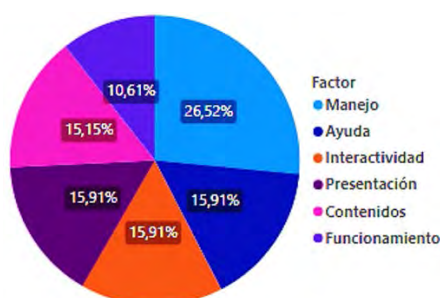


Figura 3. Incidencia de los factores de satisfacción en el producto de software

Reflejan un nivel inferior de satisfacción del software causado por falencias como falta de parametrización, cierres involuntarios de la plataforma. Así mismo, se identificaron niveles óptimos con base en la manera en que el sistema es empleado por los usuarios de la organización, tal como una influencia mínima de quejas presentadas por los mismos en relación al producto de software. Por lo descrito anteriormente se establece una incidencia tipo *Normales o Aceptables* con un valor de del 29,13% para la calidad en uso del producto.

En referencia a los factores de satisfacción de la utilidad se determinó lo siguiente: se identifica al *Manejo* como el factor de mayor incidencia según las perspectivas de los usuarios, con el 26,52% debido al aprendizaje rápido e intuitivo que brinda el sistema de información.

En contraste a lo anterior, es posible visualizar a aspectos como los *Contenidos* 15,15%, *Funcionamiento* 10,61%, demás, caracterizados por una menor incidencia referente a la satisfacción, todo ello causado por

la velocidad de acceso a la información, la organización interna de los módulos de trabajo, tiempo de respuesta, entre otros, las cuales dan lugar a consecuencias como tiempos de espera prolongados, carga pesada de los datos al software, imposibilidad de corregir los errores de digitación y demás, para los cuales se deben prever acciones de mejora con el fin de lograr a un grado de satisfacción idóneo en la gestión realizada sobre el sistema de información a partir de los procesos operativos y administrativos llevados a cabo por la entidad.

En ese mismo orden de ideas, se determinó la escala de satisfacción del producto de software, valuada bajo aspectos como nada satisfecho, poco satisfecho, normal, satisfecho y muy satisfecho. Los resultados de este proceso se enmarcan en la Figura 4 en donde se determinó el grado de incidencia que represento cada uno de estos.

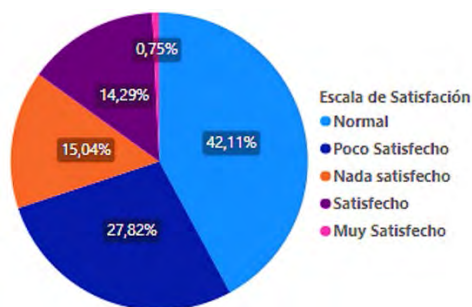


Figura 4. Incidencia de los factores de satisfacción en el producto de software

Una vez valuada la satisfacción se infirió que, respecto al nivel de utilidad percibido por el usuario, se evidencio un tipo de satisfacción moderado *Normal* del 42,11% identificando aspectos como la facilidad de manejo, auto explicación en los mensajes y demás, clasificados de tipo razonable en cuanto al grado de uso. En contraposición a lo mencionado, se establecieron niveles de tipo *Poco satisfecho*, *Nada satisfecho*, *Satisfecho*, y *Muy satisfecho* con sus respectivos resultados porcentuales, denotando un índice notable de insatisfacción al igual que un bajo índice aceptabilidad del mismo, causado por inconveniente como transición lenta entre actividades y módulos, cierre notable del software, cobertura baja en la red, nivel de ayuda en línea suministrado, entre otros.

Una vez concluida la valuación de calidad en uso, a partir de los factores asociados a la efectividad, eficiencia y utilidad, se procedió al análisis general, para lo cual se realizó la ponderación respectiva, donde posteriormente se identificó el grado de calidad que presenta el producto de software y en adición a ello, el valor restante necesario para alcanzar un nivel idóneo referente a la misma (Figura 5).

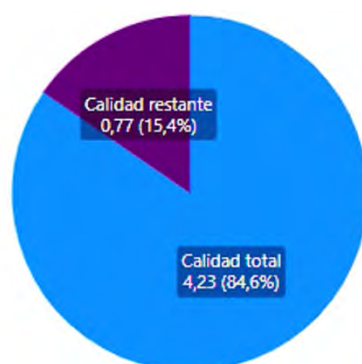


Figura 5. Valuación de la calidad en uso del producto de software

Con la valuación de la calidad en uso del producto de software , se identificó un valor de calidad del 84,6% considerada de tipo satisfactorio, en donde fue notable la incorporación de aspectos relevantes en cuanto a los tiempos operacionales en relación al desarrollo de las tareas de forma eficiente, integridad de la información, nivel de uso de la herramienta informática por parte del personal laboral especializado, entre otras, que en conjunto posibilitan el desarrollo de las operaciones funcionales en la institución prestadora de servicio IPS.

Así mismo, es posible denotar el grado de calidad restante del 15,4%, requerida para lograr un nivel adecuado de aceptación en el producto de software; acciones como: mejoramiento de la satisfacción del usuario en su interacción con el sistema, teniendo en cuenta los tiempos de espera, la transferencia de la información, capacidad o almacenamiento en los datos, parametrización adecuada, y demás ; siendo imprescindible solventar aquellos inconvenientes, a partir de planes de optimización del sistema de información, capacitaciones al personal, optimización en el otorgamiento de los permisos y roles de los usuarios, etc. Facilitando de esta forma al desarrollo eficiente de los procesos, la atención brindada por el personal, entre otros.

6. CONCLUSIONES

Para determinar la calidad en uso de un producto de software, se utilizó el método de evaluación de calidad de software basado en ISO/IEC 25000, seleccionando las características y sub características de la sección ISO/IEC 25010 tales como la efectividad, la eficiencia y la utilidad y para las mediciones se utilizaron las métricas propuestas en la ISO/IEC 25022 a partir de los cuales se tuvieron en cuenta aspectos medibles como la completitud y eficiencia en las tareas, el nivel de incidencia en los fallos reportados, la discreción funcional y finalmente el grado de satisfacción por parte de los usuarios así como el grado de inconformidad visualizado en el estudio del caso.

Como resultado de la evaluación de la calidad en uso al producto de software, aplicado al sistema de información de la Institución prestadora de salud-IPS, se determinó un índice de calidad en uso es del 84.6% con un déficit del 15.4%, lo que conduce a determinar que el nivel de calidad en uso es de grado *Notable o Sobresaliente*, lo que denota un grado de satisfacción adecuado por parte de los usuarios que interactúan con el sistema, así como un manejo conveniente de parte de estos siendo atribuible a la formación ágil en los procesos integrados por la herramienta a partir de la cual se tomó en consideración aspectos como: tiempos efectivos de desarrollo de las tareas, porcentaje discrecional de uso idóneo en cuanto a las funcionalidades suministradas, entre otros.

En contraposición a lo anterior, el valor del déficit fue reflejado con base en un grado insuficiente del almacenamiento que posee la herramienta, así como una parametrización restringida al personal de la institución, cierres involuntarios y recurrentes del sistema, y demás; los cuales se recomienda que deben ser subsanados a la mayor brevedad posible con la meta de brindar un grado de calidad excelente a todos los pacientes que llegan en busca de sus servicios.

En el análisis de los factores de calidad en uso se determinó que la efectividad recibió un nivel de puntuación excelente, indicando un nivel de satisfacción de grado *Muy satisfactorio*, con base en la cuantificación de las tareas culminadas eficazmente, como también la identificación de bajo índice de fallos causados por los usuarios. Así mismo, la eficiencia obtuvo un nivel de puntuación sobresaliente, indicado de esta forma una valoración de tipo *Satisfactorio* en la estimación de calidad del sistema causado por la cantidad de tareas realizadas en un periodo de tiempo establecido.

En contraste a lo mencionado, en la utilidad se identificó una puntuación aceptable, presentado un nivel *Normal* de satisfacción en la escala de aplicación, esto debido a que desde la perspectiva de los usuarios que interactúan con el sistema, a pesar de que este facilita el desarrollo continuo de sus actividades laborales, en muchos casos se presentan falencias como demoras en el tiempo de ejecución, restricciones al momento de realizar correcciones de digitación, el registro de nuevo personal calificado, y, en algunos casos de cierre fortuito del software.

Finalmente se resalta la importancia de evaluar la calidad en uso de un producto de software, ya que si bien, en las organizaciones no se desconoce la pertinencia que conlleva consigo la estimación de la calidad en las diferentes áreas encontradas al interior de ellas, las tácticas de valuación en factores como la eficiencia, efectividad, y utilidad no se encuentran integrados en la mayoría de los procesos operativos y administrativos. por ende, la estimación adecuada de estos factores permitiría garantizar la integridad de la información, buscando satisfacer de forma simultánea al personal que interactúa con la herramienta al interior de la institución prestadora de servicio.

REFERENCIAS

- [1] López E. (2018). Análisis de la usabilidad del sistema de trámite documentario - SISTRAM respecto a la satisfacción del usuario basado en la norma ISO/IEC 25000 de la dirección regional sectorial de educación TACNA – 2015. Trabajo de grado. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Perú.
- [2] Villegas D. (2018). Evaluación de la calidad en uso del sistema de información de apoyo a la gestión de la institución educativa (SIAGIE) de la I.E54078 Juan Espinoza Medrano - Nivel Primario, Basado en la norma ISO 25022. Trabajo de grado. Universidad Nacional José María Arguedas. Perú.
- [3] Callejas M. et al. (2017). Modelos de calidad del Software, un estado del arte. *Entramado* 13(1), 236-250.
- [4] Carrizo D. y Alfaro A. (2018). Método de aseguramiento de la calidad en una metodología de desarrollo de software: un enfoque práctico. *Ingeniare* 26(1), 114-129.
- [5] Baldeón E. (2015). Método para la evaluación de calidad del software basado en ISO/IEC 25000. Tesis de maestría. Universidad de San Martín de Porres. Perú.
- [6] Reina E. et al. (2019). Evaluación de la calidad en uso de un sistema web/móvil de control de asistencia a clases de docentes y estudiantes aplicando la norma ISO/IEC 25000 SQuaRe. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação* 19, 108-120.
- [7] Bautista V. y Robayo E. (2019). Modelo ISO/IEC 25010 en el proceso de evaluación de la calidad del software en la empresa obras civiles de Bogotá en el área de tecnología de la información y comunicación. Trabajo de grado. Universidad Católica de Colombia. Colombia.
- [8] Vaca T. (2017). Modelo de calidad del software aplicado al módulo de talento Humano del sistema informático integrado universitario UTN. Tesis de maestría. Universidad Técnica del Norte. Ecuador.
- [9] Ortega M. (2018). Sistema de Evaluación de calidad de los componentes web centrado en los usuarios finales. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- [10] Roa P. et al. (2015). Norma ISO/IEC 25000. *Tecnología Investigación y Academia* 26-32.
- [11] Segovia G. (2020). Análisis de las aplicaciones game based-learning que confluyen como desarrollo de las TIC en el área de la programación mediante la norma ISO 25000. Trabajo de grado de pregrado. Universidad Católica Santiago de Guayaquil. Ecuador.
- [12] Ordoñez H. (2018). Evaluación de la calidad en uso de productos de software para la gestión de historias clínicas. Tesis de maestría. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador.
- [13] Guzmán G. (2016). Modelo de evaluación de usabilidad web para entidades educación superior en Colombia. Tesis de maestría. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.
- [14] R-Fast. (2020). R-FAST Salud ERP. Recuperado: <https://r-fast.com/r-fast-salud-erp/>

Algoritmo para la interpretación dimensional de piezas automotrices con el uso de visión computacional y procesamiento de imágenes para el control de calidad

Thania Godinez Gamiño¹
Ylutiere Reyes Campos²
Cesar Augusto García Isais³
Instituto Politécnico Nacional
México

Procesamiento de imágenes es una herramienta de la visión computacional que permite obtener información de una imagen en lenguaje matemático para su interpretación. Dada la naturaleza de las auto partes que requieren de alta precisión para el correcto ensamblaje, surge la necesidad de utilizar herramientas que interpreten las características dimensionales precisas. En este proyecto se realizó la inspección de calidad con ayuda del procesamiento de imágenes para el análisis e interpretación de características de una pieza. Se inicia con el desarrollo de un prototipo para la captura de imágenes considerando elementos clave como la iluminación, posición y distancia de la cámara respecto de la pieza. Posteriormente, se desarrolló el algoritmo de procesamiento de imágenes que se aplicó a la pieza máster, para determinar los parámetros a utilizar como referencia en el algoritmo que fue aplicado en el resto de las imágenes de las piezas producción. Como resultado se logró la interpretación dimensional de tres características de calidad: área total, radio de círculos y distancia entre centros. Al comparar las dimensiones de las piezas de producción con las dimensiones de la pieza máster se logró identificar piezas *ok* y *no ok*, de acuerdo con las tolerancias especificadas por el diseño, dando la posibilidad de definir un método para la inspección de calidad por medio de un sistema de visión computacional.

¹ Ingeniera Industrial y Especialista en Ingeniería para el desarrollo de Sistemas de Manufactura
Contacto: tgoga7@gmail.com

² Magíster y Doctor en Ciencias de la Ingeniería Industrial y Manufactura Avanzada.
Contacto: ylreyesc@ipn.mx

³ Ingeniero Electrónico, Magíster en Instrumentación Electro-óptica y Doctor en Óptica.
Contacto: cgarciai@ipn.mx

1. INTRODUCCIÓN

Las exigencias de calidad son cada vez mayores en la industria, por lo que ha surgido la necesidad de implementar métodos innovadores desde la planificación hasta el mejoramiento de la calidad para mantener la competitividad. El control de calidad es clave en el control de procesos para garantizar el cumplimiento de altos estándares que demanda el cliente.

Este proyecto está enfocado en una industria donde se tienen procesos de producción con grandes niveles de producción a gran escala y amplia variedad de piezas detalladas y es requerido un sistema de control de calidad eficiente con el fin de obtener resultados precisos y optimizar el aprovechamiento de los recursos. Una etapa sustancial en el control de calidad de un proceso manufacturero es la inspección de calidad, donde se hace la verificación del cumplimiento de los parámetros establecidos en las especificaciones del cliente con el objetivo de que el producto o subproducto tenga óptimo funcionamiento de acuerdo con Metrics México [12].

Existen diferentes tipos de inspección de calidad dependiendo de la naturaleza del producto, y las variables críticas del mismo. Una de ellas es la inspección dimensional donde las variables críticas del producto son las dimensiones y su geometría, en este caso, los esfuerzos se enfocan en el instrumento o método de medición del producto o pieza para su correcta clasificación.

Sin embargo, la industria manufacturera enfrenta retos en este tipo de inspección por factores como la cantidad de piezas a inspeccionar y las dimensiones de estas. Existe una gran oportunidad de mejora en los métodos de medición de piezas cuyas dimensiones son milimétricas o más pequeñas. Por este motivo se ha promovido la implementación de las herramientas de la industria 4.0 para la mejora de los sistemas de inspección de calidad.

A medida que la industria avanza y cuenta con más prestaciones, las piezas van aumentando. Tal es el caso de la industria automotriz, donde actualmente un auto moderno tiene entre 70.000 y 90.000 partes que lo componen y se integran para funcionar a la perfección [9] de éstas un porcentaje de componentes son piezas milimétricas que demandan alta precisión.

La instrumentación para el control de calidad ha tenido una evolución continua. El uso de métodos manuales y tradicionales para la inspección de calidad de la producción total resulta lento, costoso e implica un alto riesgo de incurrir en un error de calidad como se analiza en el artículo de "visión y procesamiento de imágenes para control de calidad" [6]. Se han logrado dispositivos en distintos sectores industriales como automotriz, alimenticio, textiles, etc. que superan la velocidad y precisión de la mano de obra humana [8] dado que en la inspección de calidad manual influyen factores emocionales y de fatiga que pueden generar subjetividad en los resultados de inspección.

Una evolución de los sistemas de inspección dimensional son los sistemas de visión computacional que consisten en la adquisición de imágenes para su procesamiento por un ordenador donde se extraen ciertas características que se desean analizar tal como se menciona en el artículo de Giraldo Montero [7]. Con estos sistemas de visión por computadora se ha logrado automatizar el proceso de inspección de calidad aumentando su rapidez, de manera que hace posible la inspección de un mayor número de piezas en comparación con la inspección por muestreo que se realiza en la actualidad porque la velocidad de producción rebasa la de inspección de calidad.

Aunque se han desarrollado trabajos de investigación en metodologías y sistemas de visión computacional, no se ha logrado un método general que identifique todo tipo de defectos por lo que cada sistema de visión computacional está diseñado en base a las particularidades del producto a inspeccionar. En esta tesis se desarrolló un algoritmo de inspección de una pieza metálica específica, la cual es un componente de una cadena de tiempo que forma parte del sistema de transmisión de un automóvil. Sin embargo, dado que las características críticas de los cuatro componentes diferentes que la conforman son dimensionales, este algoritmo se puede replicar en el resto de las piezas para conformar el método de inspección.

2. MARCO CONCEPTUAL

- *Control de calidad.* Se le llama control de calidad a los procesos y estrategias que se aplican en un proceso a manera de filtro para la detección de elementos que no poseen las características óptimas para lograr el cumplimiento con los requerimientos de calidad [3]. A lo largo del proceso de producción se implementan puntos de control con la finalidad de identificar el cumplimiento de calidad del producto en cada etapa de su construcción y así poder atender a las variaciones, desajustes, etc.
- *Inspección de calidad.* Inspección de calidad son las actividades de revisión de parámetros críticos de un producto que se realiza con la finalidad de identificar si el producto cumple con los criterios de calidad en cada etapa del proceso. Dentro de las herramientas de la industria 4.0 que se han aplicado en la inspección son los sistemas de visión computacional que han permitido mejorar algunas de las limitaciones de los sistemas de inspección manual. Se sigue experimentando en esta aplicación dado que hasta ahora el avance es un sistema de inspección visual específico para cada producto a analizar dado que cada producto tiene rasgos muy particulares y los criterios de calidad bien definidos.
- *Visión computacional.* Visión computacional es una herramienta del procesamiento de la información que simula la percepción de la vista humana y consiste en la extracción de información a partir de una imagen haciendo uso de un computador [13]. Dentro de los retos de la industria actual se tiene que cada producto particular tiene características específicas que son críticas para su inspección de calidad por lo que no se ha llegado a un método general que aplique a la inspección de cualquier producto, sino que se ha logrado el desarrollo de algoritmos y sistemas de inspección especializados en un producto en específico. Un sistema de visión computacional tiene tres componentes principales: un dispositivo de captura de imágenes, un sistema de iluminación y un dispositivo de procesamiento [11].
- *Procesamiento de imágenes.* Matlab™ es un software que permite el procesamiento de imágenes, así como su interpretación dimensional.
 - *Imagen de color RGB.* Se representa con una matriz tridimensional $m \times n \times p$, donde m y n son los píxeles del ancho y largo respectivamente y p representa el plano, el rojo es representado con 1, el verde con 2 y el azul con 3.
 - *Imagen binaria.* Se codifican como una matriz de 0 y 1, donde 0 es negro y 1 es blanco. Son imágenes pequeñas por lo general 1 bit por píxel como se considera en [10]. En Matlab™ una imagen a escala de grises se representa por medio de una matriz bidimensional de píxeles de $m \times n$ elementos [4]. De manera general son de 8 bits por píxel, donde el valor 255 es blanco, 0 es negro y los valores intermedios son tonalidades de gris.
 - *Detección de bordes.* Es una operación de procesamiento de imágenes en donde se busca determinar regiones en una imagen identificando cambios en la intensidad de los píxeles en la imagen. En una imagen un borde es una curva que representa este cambio de intensidades en los píxeles.
 - *Binarización.* Las imágenes binarias son obtenidas a partir de una imagen en escala de grises donde los píxeles tienen valores de 0 para el negro y 1 para el blanco. Mientras que la binarización consiste en etiquetar los píxeles a partir del umbral de binarización, el cual es el nivel de grises determinado de la imagen, los píxeles con valores menores a este umbral son etiquetados como 0 y 1 los valores mayores.
 - *Segmentación.* El proceso de binarización de una imagen se realiza en base a la segmentación de la imagen por niveles de grises. La segmentación de imágenes es el proceso que particiona una imagen en regiones en base a los valores de sus píxeles como puede ser por color o textura, el objetivo principal es resaltar el objeto en la imagen del fondo, eliminando así ruido en la imagen. Umbralización es una técnica que se emplea cuando se distinguen las regiones en base a la intensidad de cada píxel donde y se considera el umbral como punto de referencia, las regiones están conformadas por los píxeles de acuerdo con su valor, una región son aquellos píxeles que tienen un valor menor al umbral, mientras que la otra región son píxeles que tienen un valor mayor al umbral. Un algoritmo utilizado para la elección del umbral automático es el método Otsu, el cual calcula de

manera iterativa el umbral óptimo [1] basado en técnicas estadísticas, considera la varianza entre los valores. El histograma representa dos distribuciones solapadas, elige el umbral óptimo con el objetivo de minimizar la varianza de cada objeto y reducir el solapamiento de la Figura 1.

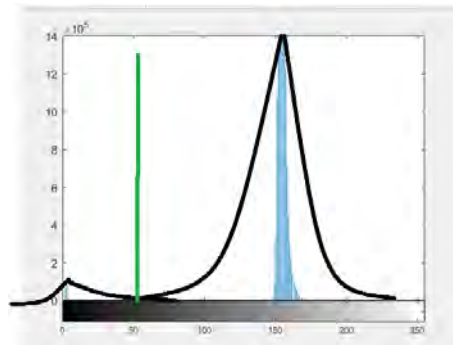


Figura 1. Histograma método Otsu

- *Detección de círculos.* Dentro de las características críticas de calidad de la pieza se encuentran las propiedades de los círculos como sus dimensiones y centralidad. El algoritmo de este proyecto calcula el tamaño de los círculos obteniendo así su radio, de igual manera calcula la distancia entre centros de ambos círculos.
- *Transformada circular de Hough.* Es una técnica de detección de figuras por medio del procesamiento de imágenes. Dado que la imagen de bordes está representada por píxeles que tienen valores de 0 y 1, cada punto del borde es un píxel con valor de 1, por lo que la transformada de Hough toma cada píxel con valor igual a 1 y obtiene sus coordenadas en x y y. En cada píxel analizado se busca si existe un círculo que pase por este punto, a la función se le agrega 1 para que se recorra a analizar el siguiente punto hasta terminar con todos los puntos del borde de la figura. Por cada punto se busca encontrar un círculo que pase por esas coordenadas (x,y) puede ser que varios círculos pasen por el mismo punto, de esta manera se identifican los centros, son aquellos puntos cuyo valor sea mayor.
- *Distancia entre centros.* Para el cálculo de la distancia entre centros se realiza con la ecuación (1), considerando como coordenadas de centros las obtenidas con el algoritmo tras aplicar la Transformada de Hough.

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5)$$

- *Cálculo de área.* Para el cálculo del área de la pieza se utilizó la función *regionprops*, esta función realiza el análisis morfológico de la imagen determinando propiedades como el área, perímetro, centroides de la figura, etc. Esta función analiza la imagen agrupándola por regiones. Esta función se aplica a la imagen binaria etiquetada para la identificación de las diferentes regiones a analizar.

3. MÉTODO

Un sistema de visión computacional tiene tres componentes principales: un dispositivo de captura, un sistema de iluminación y un dispositivo de procesamiento [11]. El dispositivo de captura de la imagen y la fuente de iluminación son parte de la etapa de adquisición de la imagen a analizar, mientras que como dispositivo de procesamiento se utiliza un computador, siendo un algoritmo de procesamiento de imagen con el software Matlab™.

Para fines de este proyecto se utilizó una pieza proporcionada por la empresa como el modelo de la pieza, cuyo nombre se le atribuye *pieza Máster*. La imagen de la pieza Máster funcionó como elemento para definir parámetros de calidad y conversión de resultados a dimensiones reales. Se le llama *pieza producción* a las piezas que se van a inspeccionar para su clasificación de calidad. Se capturaron imágenes de las piezas producción para su posterior procesamiento e interpretación dimensional lo cual es logrado en el algoritmo.

Después se comparan las dimensiones de la pieza Máster contra la pieza producción para determinar si cumple con los criterios de calidad considerando las tolerancias especificadas en el plano dimensional de la pieza. En la Figura 2 se muestra una representación gráfica del funcionamiento de la propuesta de inspección con el algoritmo de visión computacional desarrollado.

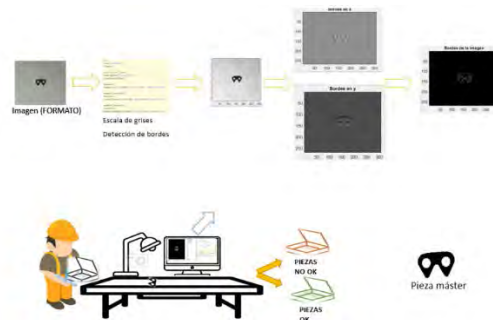


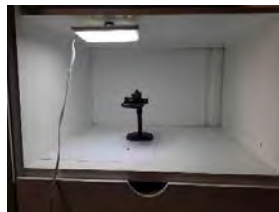
Figura 2. Procesamiento de imagen para interpretación dimensional

3.1 Desarrollo del prototipo

Para la adquisición de las imágenes de las piezas a analizar se trabajó en la captura bajo las condiciones óptimas para lograr una imagen clara, sin sombras y definida. Para esto se experimentó con las variables de las condiciones: posición de la cámara, posición de la fuente de iluminación, resolución de cámara, fondo y distancias, véase Tabla 1 Pruebas de captura de imágenes. Tras las pruebas de captura de imágenes se logró a las siguientes condiciones finales: como dispositivo de captura de las imágenes se utilizó una cámara de fotografía profesional marca canon de 24 Megapíxeles. Como iluminación se utilizó una lámpara led con un consumo de 0,22 amperios. Para el procesamiento de las imágenes se desarrolló un algoritmo en el programa computacional Matlab™, donde se procesan las imágenes para su análisis dimensional y posterior clasificación de calidad.

Tabla 1. Pruebas de captura de imágenes

Descripción	Materiales	Área de oportunidad
Captura de imagen con 1 lámpara Toma de imágenes con una lámpara paralela al plano que contiene la pieza, arriba de la cámara.	- Celular 13 Mega Píxeles - 1 lámpara led potencia 15W. - Hojas blancas como cubierta de las lámparas. - Hoja blanca de papel - Porta celular - Bases sujetadoras	En la imagen se aprecia un exceso de brillo de la pieza.



Captura de imagen con 2 lámparas Toma de imágenes con dos lámparas iluminando la pieza, una a cada lado del prototipo de manera paralela a la superficie plana donde se encuentra la hoja blanca y sobre ella, la pieza. Posición de la fuente de iluminación: arriba y paralela al plano que contiene la pieza. Distancia de la fuente de iluminación a la pieza: Posición de la cámara respecto a la superficie donde está la pieza: perpendicular	- Celular 13 Mega Píxeles - 2 lámparas led potencia 15W. - Hoja blanca de papel - Porta celular - Bases sujetadoras	En la imagen se observa sombra de la pieza, así como los bordes indefinidos.
--	---	--



Imagen fallida prueba sombra

Captura de imagen a contraluz con 1 lámpara.

Toma de imágenes con cámara fotográfica canon, donde la pieza está sobre de la lámpara y la cámara está direccionada hacia abajo.

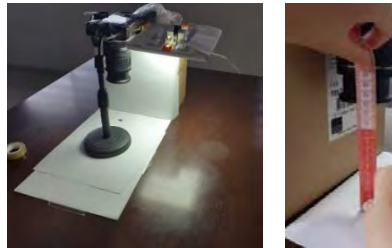
Posición de la fuente de iluminación: encima de la pieza a una distancia de 13cm.

Distancia de la fuente de iluminación a la pieza:

Posición de la cámara respecto a la superficie donde está la pieza: perpendicular

- Cámara fotográfica 24MP Canon
- 1 lámpara led potencia 15W.
- Hoja blanca de papel
- Porta celular
- Bases sujetadoras

Ruido en la imagen de la pieza
Se aprecia sombra en los bordes de la pieza.
Se aprecia ruido en forma de círculos alrededor de la pieza.



Prototipo de captura de imágenes

Captura de imagen con 1 lámpara

Toma de imágenes con cámara fotográfica canon, donde la pieza está sobre de la lámpara y la cámara está direccionada hacia abajo.

Posición de la fuente de iluminación: debajo de la pieza.

Distancia de la fuente de iluminación a la pieza:

Posición de la cámara respecto a la superficie donde está la pieza: perpendicular

- Cámara fotográfica 24MP Canon
- 1 lámpara led potencia 15W.
- Hoja blanca de papel
- Bases sujetadoras



Dispositivo de captura de imagen - Cámara fotográfica

3.2 Desarrollo de algoritmo

El algoritmo desarrollado sigue la secuencia de pasos del diagrama de flujo de la Figura 3.

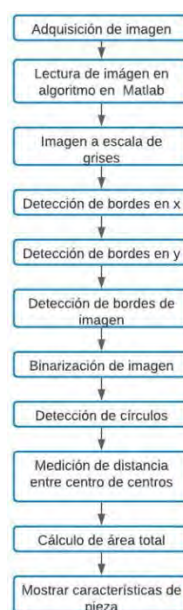


Figura 3. Método procesamiento de imagen

1. *Adquisición de la imagen:* en esta etapa se captura la imagen de la pieza a analizar con el dispositivo, se utilizó una cámara fotográfica profesional que se describe en la Tabla 1, el formato de la imagen es jpg.

La captura de imágenes se toma bajo condiciones controladas en las cuales la iluminación, posición de la cámara con respecto de la pieza, distancia de la cámara a la pieza, fondo y dispositivo son iguales para la captura de las imágenes de todas las piezas. La calibración del dispositivo se realiza al inicio de la captura de las imágenes tras la captura de la imagen de la pieza máster y ser comparada con las dimensiones del diseño de la pieza. Esto se realiza al inicio del proceso de captura de imágenes dado que éstas son tomadas bajo las mismas condiciones.

2. *Lectura de imagen*: consiste en la lectura de la imagen en el algoritmo usando la función *imread* seguido del nombre de la imagen y el formato de la imagen.
3. *Imagen a escala de grises*: se convierte la imagen con valores de 0 a 255 en sus pixeles, representada en escalas de grises.
4. *Detección de bordes*: se calcula la magnitud de los bordes considerando los bordes en los ejes x y y . Se realizó la detección de bordes en cada eje del plano (x, y) , posteriormente se calcularon los bordes de la imagen integrando ambos ejes (Figura 4).

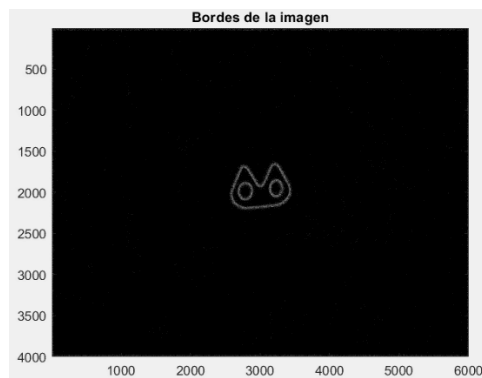


Figura 4. Bordes de la imagen

5. *Binarización de imagen*. Al graficar la distribución de los niveles de grises se observa en el histograma que la distribución es bimodal (Figura 5). Esto permite lograr un buen contraste en la imagen y resaltar la silueta de la pieza en la imagen binarizada.

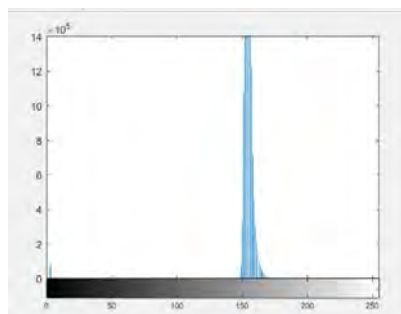


Figura 5. Histograma de distribución de niveles de grises

Para la binarización de la imagen se lleva a cabo un proceso de segmentación de la intensidad de los pixeles basado en el umbral general de la imagen (Figura 6). La función en Matlab™ que determina el umbral óptimo utiliza el método Utso.

```
Command Window
umbral =
0.3255
```

Figura 6. Valor de umbral de imagen

La imagen binarizada se muestra como una matriz, donde se tienen valores de 0 y 1, donde 1 representa negro y 0 es blanco, lo cual identifica los bordes de la imagen como se muestra en la Figura 7.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1											
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 7. Matriz representación imagen binaria

6. *Detección de círculos por transformada de Hough:*

- Cálculo de acumulador: por cada punto de la imagen se buscan todas las posibles figuras que pueden pertenecer a ese punto y se logra mediante las combinaciones de valores de parámetros que describen la figura.
- Detección de centros de círculos: al graficar los círculos acumulados se identifica el centro de la figura.
- Gráfica de círculos sobre la imagen: una vez que hace la detección de círculos se programa para que resalte los círculos encontrados en la imagen.

La función de la transformada circular de Hough itera en los pixeles de la imagen identificando todos los círculos que pasan por cada uno de los puntos de los bordes de la imagen, lo cual se representa como una matriz tal se muestra en la Figura 8. Al final se determinan los centros donde se tiene la mayor concurrencia de círculos que pasan por ese punto, en la Figura 9 se aprecia cómo se traza círculos a lo largo de todo el borde la figura. A partir de la imagen binarizada se realiza el cálculo de área y propiedades de la imagen, donde se identifican regiones para cálculo como se muestra en la Figura 10.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	2	3	5	6	5	6	5	1	4
2	4	6	2	4	8	3	7	4	2	7
3	3	5	2	5	4	4	1	3	2	8
4	2	7	4	2	3	2	1	3	3	1
5	3	3	3	4	2	5	7	3	2	6
6	4	4	4	3	6	4	3	3	3	5
7	4	5	2	4	8	2	8	4	3	2
8	3	6	3	6	4	6	7	8	2	7
9	7	8	5	2	3	4	1	3	3	3
10	2	6	5	3	6	4	6	2	7	2
11	2	7	3	3	2	0	3	3	6	4
12	2	2	4	4	3	6	5	2	1	6
13	6	2	2	1	4	3	3	4	2	1
14	4	5	2	5	3	1	4	3	3	6
15	3	4	2	3	2	2	1	5	2	7
16	2	3	6	2	1	4	7	6	2	6

Figura 8. Matriz acumuladora de círculos

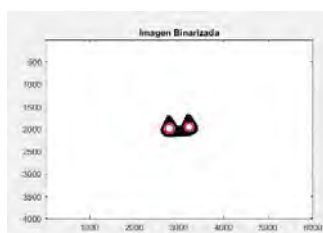


Figura 9. Imagen binarizada con círculos detectados



Figura 10. Regiones para cálculo de propiedades

En la interpretación de resultados se consideró una conversión a milímetros de manera línea, considerando como parámetro de calibración la pieza máster y el plano de la pieza donde se detallan las dimensiones de la pieza y sus tolerancias. Todas las imágenes fueron tomadas bajo las mismas condiciones, la misma distancia de la pieza a la cámara y posición de la fuente de iluminación. La distancia entre centros es el parámetro que se utilizó para establecer la equivalencia lineal de pixeles con milímetros de acuerdo con las medidas del plano de especificaciones de la pieza.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados del presente proyecto se centran en lograr la interpretación dimensional de la pieza ILP para su clasificación de calidad. Para el logro de dicho objetivo, se creó una base de datos de imágenes a color de las piezas a analizar, que tienen como etiqueta *piezas de producción* (Tabla 3), de la misma manera se realizó la captura de imagen de la pieza Máster, la cual es el modelo de pieza que tiene la empresa como referencia, es por esto por lo que la interpretación de la pieza máster define los parámetros de calidad de la pieza.

Tabla 2. Interpretación dimensional de piezas producción

Pieza producción 1	Pieza producción 2
<p>Los parámetros de la PIEZA PRODUCCIÓN 1 son los siguientes:</p> <p>Area total de pieza= 233.4173</p> <p>Radio círculo 1 en milímetros= 9.4872e-04</p> <p>Radio círculo 2 en milímetros= 8.9459e-04</p> <p>Distancia entre centros en milímetros= 6.6937</p> <p>Pieza rechazada dado que la diferencia entre los parámetros de esta pieza con la pieza máster exceden los mm de tolerancia en las especificaciones. Dado que el área total de la pieza máster es 233.3494 como se muestra en la ilustración 28, al calcular la diferencia con el área de la pieza producción 1, tenemos como resultado 0.0679, lo cual es mayor que la tolerancia de 0.02mm.</p>	<p>Los parámetros de la PIEZA PRODUCCION 2 son los siguientes:</p> <p>Area total de pieza= 233.3647</p> <p>Radio círculo 1 en milímetros= 9.4382e-04</p> <p>Radio círculo 2 en milímetros= 8.9447e-04</p> <p>Distancia entre centros en milímetros= 6.1696</p> <p>Pieza rechazada dado que la diferencia entre la distancia entre centros con respecto a la pieza máster exceden los 0.02 mm de tolerancia en las especificaciones. El tamaño de los círculos si cumple con los parámetros, pero no la distancia entre estos.</p>
Pieza producción 3	Pieza de producción 4
<p>2.7629e+03 1.9426e-03</p>  <p>Detección de 1 círculo</p> <p>En el caso de la pieza de producción 3, es una pieza rechazada dado que el algoritmo solo encontró un círculo, se puede apreciar en la imagen el círculo resaltado con rojo del lado izquierdo, mientras que la figura sombreada con amarillo del lado derecho no es una circunferencia, por lo tanto, rechaza la pieza ya que no cumple con la especificación de tener dos círculos.</p>	<p>Los parámetros de la PIEZA PRODUCCIÓN 4 son los siguientes:</p> <p>Area total de pieza= 233.4008</p> <p>Radio círculo 1 en milímetros= 9.5076e-04</p> <p>Radio círculo 2 en milímetros= 9.1005e-04</p> <p>Distancia entre centros en milímetros= 6.325</p> <p>En el caso de la pieza de producción 4, es aceptada dado que las dimensiones están dentro de las especificaciones de calidad tomando como referencia la pieza máster.</p>
	

Se inició con el desarrollo del prototipo para la captura de imágenes considerando elementos clave como la iluminación, la distancia de la cámara a la pieza, la resolución de la cámara y la posición de la cámara con respecto a la pieza. La función del algoritmo es la interpretación de la pieza mediante la característica de área total de la pieza y distancia de centros de círculos. El algoritmo tiene la capacidad de identificar si los orificios de la pieza son círculos como las especificaciones de la pieza.

Se logró obtener el resultado de la captura de imágenes de prueba para analizar, dado el logro del prototipo después de experimentación para lograr la imagen más acertada. El algoritmo determina el área total y la distancia entre centros de círculos de la pieza máster, así como también de las piezas de producción a inspeccionar dando la capacidad de determinar si una pieza es aceptada o rechazada dados los parámetros de calidad determinados por la pieza máster.

5. CONCLUSIONES

Recomendaciones:

- Toma de imágenes a contraluz para lograr alto contraste entre la pieza y el fondo con el objetivo de mantener la máxima información de los bordes al momento de binarizar la imagen.
- Aplicación de técnica de umbralización por el método de Otsu.
- Detección de círculos por la transformada circular de Hough.

Discusión:

- Dentro de los principales retos del proyecto está el desarrollo del prototipo para la captura de imágenes, dado que la calidad de la imagen es un factor clave para mantener el máximo de información de la imagen y realizar un análisis más preciso.
- En la fase de captura de imágenes es de suma importancia controlar los parámetros de distancia de la pieza a la cámara y la posición de la fuente de iluminación, la captura de imágenes en este proyecto se realizó con un dispositivo no especificado como uso industrial, en este caso es necesario asegurar que las imágenes de las diferentes piezas son tomadas exactamente bajo las mismas condiciones, de esta manera se puede hacer un análisis más preciso, disminuyendo la influencia de la calidad de la cámara en los resultados.
- La toma de imágenes a contraluz produce una imagen con mayor contraste lo que favorece el procesamiento de la imagen, tal como lo es la binarización que es de suma importancia lograr la mejor imagen para evitar perder información por no tener una imagen bien contrastada.

Conclusiones:

- Como resultado de este proyecto se logra interpretar dos características críticas de calidad de la pieza ILP: área total y distancia entre centros de los círculos formados por los orificios que tiene la pieza. La interpretación de estas características se obtiene a través del procesamiento de la imagen en el algoritmo desarrollado.
- Se logró capturar las imágenes de la pieza máster y las piezas producción en un ambiente controlado (distancia de la cámara a la pieza, iluminación y posición de la pieza) lo que favorece su análisis y comparación.
- Se aplicó el algoritmo a las piezas producción con los parámetros ya definidos como resultado de la aplicación del algoritmo a la pieza Máster. De la misma manera, se logró la interpretación de dos características críticas de las piezas producción, lo cual permitió hacer una comparativa entre las dimensiones de la pieza producción y la pieza Máster, determinando así, si la pieza cumplió con los criterios de calidad y es aceptada o rechazada.
- La aplicación de la transformada de Hough en el algoritmo de la pieza producción permite identificar círculos con el radio ya definido como parámetro de calidad tras la interpretación de la pieza máster.

REFERENCIAS

- [1] Carela A. (2019). Tratamiento digital de imágenes en matlab para la detección de fallas. Recuperado: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi-wdJ7k4L1AhUDTTABHbh3CVAQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fupcommons.upc.edu%2Fbitstream%2Fhandle%2F2117%2F330399%2FMemoria_TFG_Pablo_Andres_Carela.pdf%3Fsequence%3D1%26i
- [2] Academia. (2018). Aplicaciones de la visión artificial. Recuperado: https://www.academia.edu/23702437/APLICACIONES_DE_LA_VISI%C3%93N_ARTIFICIAL

- [3] Cubillos M. y Rozo D. (2009). El concepto de calidad: Historia, evolución e importancia para la. Revista de la Universidad de La Salle 48.
- [4] Cuevas E. y Zaldivar D. (2017). Visión por computador utilizando Matlab y el toolbox de procesamiento de imágenes. Recuperado: https://www.academia.edu/9081270/Visi%C3%B3n_por_Computador_utilizando_MatLAB_Y_el_Toolbox_de_Procesamiento_Digital_de_Im%C3%A1genes
- [5] De la Fuente E. y Trespaderne F. (2012). Visión artificial industrial Procesamiento de Imágenes para inspección Automática y Robótica. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial.
- [6] Diaz G. (2014). Visión y procesamiento de imágenes para control de calidad. Revista Universidad Eafit 103.
- [7] Giraldo C. (2007). Dimensionamiento de piezas usando el sistema de visión de la celda de manufactura flexible en la facultad de ingeniería mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [8] Jaramillo A. et al. (2014). Inspección de calidad para un sistema de producción industrial basado en el procesamiento de imágenes. Tecnura 18(41), 76-90.
- [9] Turbo. (2019). ¿Cuántas piezas componen un carro moderno? Recuperado: <https://www.revistaturbo.com/noticias/cuantas-piezas-componen-un-carro-moderno-2186>
- [10] Maldonado C. (2015). Sistema de reconocimiento de fichas de ajedrez. Recuperado: https://www.academia.edu/16292054/SISTEMA_DE_RECONOCIMIENTO_DE_FICHAS_DE_AJEDREZ?email_work_card=view-paper
- [11] Mera C. (2017). Detección de defectos en sistemas de inspección visual automática a través del aprendizaje de múltiples instancias. Universidad Nacional de Colombia.
- [12] MES. (2019). Metrics México. Inspección de calidad en un producto. Recuperado: <https://metricsmexico.com/inspeccion-de-calidad-en-un-producto/>
- [13] Molleda J. (2008). Universidad de Oviedo. Recuperado: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewi8rfvax_H0AhXZQzABHcaaAXgQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.tdx.cat%2Fbitstream%2Fhandle%2F10803%2F11139%2FUOV0060TJMM.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AOvVaw1FcqCUtonDkuXQ-ejASzI7
- [14] Rojas T. (2008). Sistema de visión por computadora para la detección de objetos esféricos. Ingeniería UC 12.

Mejoramiento del proceso de revisión tecnomecánica para motocicletas en un centro de diagnóstico automotor por medio de una simulación por eventos discretos en promodel

Luis Emiro Meneses Espinosa¹
Duván Ernesto Meneses Espinosa²
Jaime Humberto Mendoza Chacón³
Nora Fernanda Arciniegas Sánchez⁴
Fundación Universitaria de Popayán
Colombia

Se busca mejorar la ruta de procedimientos establecidos en un Centro de Diagnóstico Automotor CDA, específicamente para el proceso de emisión de certificados, para un proceso en el que se identifican seis elementos: selección, interrupción, caja, determinación, inspección y atestación. Se definieron los conceptos teórico-prácticos del estudio de tiempos y luego para el proceso de mejora se llevó a cabo un estudio de tiempos para los elementos mediante el cálculo del tiempo normal y estándar. Con base en la muestra de datos obtenida y los tiempos estándar, se nota un cuello de botella en el proceso, donde se presenta interrupciones; se propone eliminar sus efectos y con ello mejorar el tiempo estándar para incrementar la emisión de certificados. Con la finalidad de validar la mejora propuesta se llevó a cabo una serie de simulaciones en Promodel, incluyendo los elementos de la emisión de certificados. Se simula con tres valores de tiempo de llegada de los clientes, con y sin el efecto de las interrupciones. Con el efecto de las interrupciones se observa el cuello de botella en el área de selección e inspección. Posteriormente, se elimina el efecto de las interrupciones en el área de selección, y en las simulaciones se observa una notable disminución en el cuello de botella en esta área, validándose de esta manera la mejora propuesta en el CDA.

¹ Ingeniero Industrial.

² Ingeniero Industrial.

³ Doctor en Ingeniería.

Contacto: jaimemendoza@docente.fup.edu.co

⁴ Ingeniera Industrial y Estudiante de Maestría en Ingeniería.

Contacto: fernanda.arciniegas@docente.fup.edu.co, arciniegasfernanda@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Disminuir los tiempos de atención en los procesos, con la finalidad de mejorar la productividad y con ello aumentar su competitividad, es de gran interés en las empresas, debido a la exigencia del mercado y la globalización, se requieren respuestas rápidas y eficientes ante las necesidades del mercado, estableciendo sistemas productivos estandarizados.

En consecuencia, en el sector es relevante la mejorara de los procesos en determinadas áreas funcionales, con la finalidad de ser competitivos en el mercado; lo cual permite mejorar el desarrollo de producción de un producto o prestación de un servicio, a través del análisis de la ejecución propia de la organización.

Los métodos y los tiempos son herramientas que permiten disminuir reprocesos y desperdicios, y aumentar la productividad en la organización; por esto, se considera un mecanismo capaz de mejorar la forma de prestar el servicio o producir un bien.

En empresas como los Centros de Diagnóstico Automotor CDA se llevan a cabo procesos, como la revisión-técnico mecánica y de emisiones contaminantes RTMYEC, el cual es un procedimiento establecido para vehículos automotores, donde se verifican las condiciones mecánicas, ambientales y de seguridad; tales procesos pueden presentar retardos debido a mal manejo los recursos, personal no idóneo, asignación inadecuada de labores, entre otros; lo cual puede llevar a una baja calidad de la prestación del servicio y con ello una baja satisfacción del cliente.

Esta investigación inicia con la definición del método de trabajo, determinando cada uno de los aspectos más relevantes del proceso objeto de estudio, tales como, la selección del método, selección de operarios, hacer las observaciones con base en la aplicación de fórmulas y el cálculo de indicadores claves para el desempeño del proceso; por otra parte, con los resultados obtenidos, se realizan las propuestas de mejora a través de la evaluación de distintos escenarios a través del uso de Promodel, permitiendo identificar aquel que genera valor al proceso tanto en gestión como en costos.

2. MÉTODO

Inicialmente se llevó a cabo la medición del trabajo, donde se selecciona el método de trabajo, se selecciona los trabajadores, se descomponen las tareas, se califica el desempeño, se estiman los tiempos normales, estándar y las holguras. Luego se determina los cuellos de botella y finalmente se hallan los indicadores de desempeño.

2.1 Medición del trabajo

En esta fase del proyecto, se procede a realizar la toma de tiempos de cada proceso, y posteriormente hallar el tiempo estándar de la entrega del certificado de la revisión técnico-mecánica y de gases. Se realiza la medición del trabajo, asumiendo que los tiempos actuales son los mejores establecidos para llevar a cabo cada proceso. Se toman los tiempos registrando el valor mostrado por el cronometro. A continuación, se describe cada paso:

1. *Selección método de trabajo.* Se observa la manera como el operario realiza el proceso, verificando que se halle trabajando como se estableció cuando se fijó el método.
2. *Selección de trabajadores.* La medición del trabajo se realizó seleccionando un trabajador capacitado, con la destreza necesaria para ejecutar el trabajo y en condiciones normales; con lo cual se tiene el siguiente personal por área:
 - Selección: Operaria
 - Caja: Operarios (2)
 - Inspección: Operarios (3)
 - Atestación: Operarios (2)

3. *Descomposición de la tarea o el trabajo en elementos y delimitarlos.* Los procesos o elementos son indivisibles, su tiempo de duración es relativamente corto, además son de fácil identificación, de comienzo y final definido. Se muestra en la Tabla 1 la delimitación de los procesos que componen la emisión del certificado de revisión técnico-mecánica y de gases.

Tabla 1. Elementos para la toma de tiempos

Elemento	Tipo	Toma de tiempo	
		Inicio	Fin
Selección	Indivisible	Inicio de la toma de datos.	Final de la toma de datos.
Caja	Indivisible	Recepción de documentos para liquidación.	Pago por parte del usuario.
Determinación	Indivisible	Cargue de datos en el sistema.	Fin de cargue de datos en el sistema.
Inspección	Indivisible	Inicio prueba	Aviso a recepción sobre aprobación de inspección.
Atestación	Indivisible	Al ser aprobada la revisión, se inicia el cargue de datos en el portal RUNT.	Entrega de certificado al usuario.

4. *Tamaño de muestra y número de observaciones a cronometrar.* El método de la formula o método estadístico se aplicó para determinar el número de observaciones para cada elemento del proceso, en la emisión del certificado de revisión técnico-mecánica y de gases, como se muestra en la Tabla 2; cuyos cálculos se realizaron con base a la ecuación (1).

$$N = \left(\frac{40 \cdot \sqrt{(n \cdot \sum X^2) - (\sum X)^2}}{\sum X} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

N: Tamaño de la muestra que se desea determinar.

n: Número de observaciones del estudio preliminar.

X: Tiempos de observaciones.

Tabla 2. Muestras

	Selección		Interrupción		Caja		Determinación		Inspección		Atestación	
	X	X2	X	X2	X	X2	X	X2	X	X2	X	X2
1	2,50	6,25	1,00	1,00	0,33	0,11	4,58	20,98	9,25	85,56	4,10	16,81
2	3,10	9,61	1,00	1,00	0,31	0,10	5,22	27,25	9,38	87,98	3,59	12,89
3	2,43	5,90	1,02	1,04	0,39	0,15	5,10	26,01	8,34	69,56	4,30	18,49
4	3,15	9,92	1,01	1,02	0,35	0,12	4,59	21,07	7,34	53,88	5,07	25,70
5	3,34	11,16	1,20	1,44	0,32	0,10	5,53	30,58	9,55	91,20	4,45	19,80
6	2,48	6,15	1,00	1,00	0,33	0,11	5,26	27,67	8,23	67,73	4,05	16,40
7	3,13	9,80	1,11	1,23	0,31	0,10	5,51	30,36	7,65	58,52	4,15	17,22
8	3,19	10,18	1,00	1,00	0,42	0,18	5,30	28,09	8,43	71,06	4,18	17,47
9	3,22	10,37	1,25	1,56	0,31	0,10	5,51	30,36	7,43	55,20	4,34	18,84
10	3,60	12,96	1,00	1,00	0,27	0,07	5,24	27,46	8,53	72,76	4,17	17,39
Suma	30,14	92,29	10,59	11,30	3,34	1,13	51,84	269,82	84,13	713,47	42,40	181,02
N		10		10		10		10		10		10
N		26		11		24		6		13		11

Se agrega el ítem de interrupción, debido a que el operario constantemente presenta actividades no relacionadas con el área de selección. Se emplean las siguientes ecuaciones en el proceso.

$$\text{Selección: } N = \left(\frac{40 \cdot \sqrt{(10 \cdot 92,29) - 30,14^2}}{30,14} \right)^2 = 25,69 \cong 26$$

$$\text{Caja: } N = \left(\frac{40 \cdot \sqrt{(10 \cdot 1,13) - 3,34^2}}{3,34} \right)^2 = 24,14 \cong 24$$

$$\text{Determinación: } N = \left(\frac{40 \cdot \sqrt{(10 \cdot 269,82) - 51,84^2}}{51,84} \right)^2 = 6,43 \cong 6$$

$$\text{Inspección: } N = \left(\frac{40 \cdot \sqrt{(10 \cdot 713,47) - 84,13^2}}{84,13} \right)^2 = 12,84 \cong 13$$

$$\text{Atestación: } N = \left(\frac{40 \cdot \sqrt{(10 \cdot 181,02) - 42,4^2}}{42,4} \right)^2 = 11,05 \cong 11$$

$$\text{Interrupción: } N = \left(\frac{40 \cdot \sqrt{(10 \cdot 11,3) - 10,59}}{10,59} \right)^2 = 11,45 \cong 11$$

Teniendo en cuenta los valores del tamaño de la muestra encontrados para cada elemento, se seleccionada el de mayor valor, por tanto, se decide realizar un total de 26 observaciones para todos los elementos.

En la Tabla 3, se muestran los tiempos registrados en las 26 observaciones.

Tabla 3. Muestras totales (minutos)

Muestras	Fecha	Selección	Interrupción	Caja	Determinación	Inspección	Atestación	Tiempo
1	09/12/2019	2,50	1,00	0,33	4,58	9,25	4,10	21,76
2	09/12/2019	3,10	1,00	0,31	5,22	9,38	3,59	22,6
3	09/12/2019	2,43	1,02	0,39	5,1	8,34	4,30	21,58
4	09/12/2019	3,15	1,01	0,35	4,59	7,34	5,07	21,51
5	09/12/2019	3,34	1,20	0,32	5,53	9,55	4,45	24,39
6	09/12/2019	2,48	1,00	0,33	5,26	8,23	4,05	21,35
7	09/12/2019	3,13	1,11	0,31	5,51	7,65	4,15	21,86
8	09/12/2019	3,19	1,00	0,42	5,3	8,43	4,18	22,52
9	10/12/2019	3,22	1,25	0,31	5,51	7,43	4,34	22,06
10	10/12/2019	3,60	1,00	0,27	5,24	8,53	4,17	22,81
11	10/12/2019	3,52	2,00	0,30	5,1	9,22	4,03	24,17
12	10/12/2019	3,43	0,00	0,34	5	8,43	4,21	21,41
13	10/12/2019	3,28	1,12	0,39	5,16	8,33	4,32	22,6
14	10/12/2019	3,25	10,03	0,35	6	7,64	4,38	31,65
15	10/12/2019	3,13	2,00	0,32	5,2	7,33	5,06	23,04
16	11/12/2019	4,00	8,52	0,33	5,23	7,76	4,39	30,23
17	11/12/2019	4,00	1,00	0,31	5,47	8,03	4,12	22,93
18	11/12/2019	4,00	1,11	0,32	6,1	8,05	4,23	23,81
19	11/12/2019	3,27	0,51	0,40	5,48	8,56	5,10	23,32
20	11/12/2019	3,42	0,48	0,43	4,34	7,32	4,11	20,1
21	11/12/2019	3,56	2,27	0,37	5,38	7,22	4,00	22,8
22	11/12/2019	3,36	1,00	0,36	6	7,74	4,30	22,76
23	12/12/2019	3,07	8,24	0,33	5,52	8,4	4,50	30,06
24	12/12/2019	3,55	15,00	0,31	5,6	7,33	4,45	36,24
25	12/12/2019	3,19	1,26	0,32	5,6	9,32	4,05	23,74
26	12/12/2019	3,27	1,58	0,40	5,3	8,43	4,15	23,13
27	12/12/2019	3,31	7,25	0,43	5,8	7,74	5,02	29,55
28	12/12/2019	3,33	1,57	0,37	6,1	7,4	4,34	23,11
29	12/12/2019	3,39	1,45	0,36	5,32	7,32	4,17	22,01
30	12/12/2019	2,57	5,28	0,33	5,4	9,21	4,03	26,82
31	13/12/2019	3,34	1,00	0,31	5,6	8,44	4,21	22,9
32	13/12/2019	3,56	12,40	0,32	5,12	7,32	4,32	33,04
33	13/12/2019	3,26	0,59	0,28	5,32	8,21	4,30	21,96
34	13/12/2019	3,48	1,30	0,37	6,12	7,43	4,45	23,15
35	13/12/2019	3,34	3,00	0,31	6,3	8,53	4,15	25,63
36	13/12/2019	3,12	8,31	0,39	6	7,43	4,17	29,42
37	13/12/2019	4,00	1,20	0,42	6,16	7,32	4,21	23,31
38	13/12/2019	3,49	1,00	0,39	5,7	10,23	5,06	25,87
39	16/12/2019	3,32	7,48	0,33	5,6	9,4	4,39	30,52
40	16/12/2019	3,19	16,31	0,45	5,9	10,87	4,23	40,95
41	16/12/2019	4,00	1,10	0,42	5,8	8,43	4,11	23,86
42	16/12/2019	3,53	5,00	0,39	6,2	7,87	4,30	27,29
	Mediana	3,33	1,23	0,34	5,50	8,22	4,23	
	Promedio	3,33	3,36	0,35	5,49	8,25	4,32	

5. *Calificación de desempeño.* La calificación de desempeño o determinación del factor de valoración se realiza para el presente proyecto, usando el sistema británico, asignando una valoración de 100% cuando la operación se realiza en un tiempo optimo, a juicio del observador. En la Tabla 4, se observan los valores asignados.

6. *Determinación del tiempo normal.* El tiempo normal TN se obtiene a partir del producto del tiempo observado Te por el factor de valoración FV. El tiempo normal fue calculado para cada elemento (proceso) según la ecuación (2). Posteriormente se realizó la sumatoria de tiempos normales a fin de calcular el tiempo normal de la tarea (emisión del certificado).

$$TN = Te * FV \quad (2)$$

Donde:

TN: Tiempo normal para cada elemento

Te: Mediana de los tiempos observados de todas las muestras, para cada elemento.

FV: Factor de valoración, calculado para cada elemento.

En las Tablas 4 a 7 se muestran los resultados de los tiempos normales.

Tabla 4. Muestras 1-8 (minutos)

Área		1	2	3	4	5	6	7	8
Selección	TO	2,50	3,10	2,43	3,15	3,34	2,48	3,13	3,19
	FV	0,70	0,65	0,75	0,80	0,70	0,09	0,80	0,75
	TN	1,75	2,02	1,82	2,52	2,34	0,21	2,50	2,39
Caja	TO	0,33	0,31	0,39	0,35	0,32	0,33	0,31	0,42
	FV	1,00	0,90	0,95	0,90	0,95	1,00	0,90	0,95
	TN	0,33	0,28	0,37	0,32	0,30	0,33	0,28	0,40
Determinación	TO	4,58	5,22	5,10	4,59	5,53	5,26	5,51	5,30
	FV	0,95	0,90	0,95	1,00	0,90	0,85	0,90	0,90
	TN	4,35	4,70	4,85	4,59	4,98	4,47	4,96	4,77
Inspección	TO	9,25	9,38	8,34	7,34	9,55	8,23	7,65	8,43
	FV	0,90	0,90	1,00	1,00	0,95	0,95	0,90	1,00
	TN	8,33	8,44	8,34	7,34	9,07	7,82	6,89	8,43
Atestación	TO	4,10	3,59	4,30	5,07	4,45	4,05	4,15	4,18
	FV	0,95	1,00	0,95	0,85	0,90	1,00	1,00	0,90
	TN	3,90	3,59	4,09	4,31	4,01	4,05	4,15	3,76
Interrupción	TO	1,00	1,00	1,02	1,01	1,20	1,00	1,11	1,00
	FV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	TN	1,00	1,00	1,02	1,01	1,20	1,00	1,11	1,00

Tabla 5. Muestras 9-17 (minutos)

Área		9	10	11	12	13	14	15	16	17
Selección	TO	3,22	3,60	3,52	3,43	3,28	3,25	3,13	4,00	4,00
	FV	0,85	0,80	0,65	0,70	0,80	0,85	0,75	0,85	0,70
	TN	2,74	2,88	2,29	2,40	2,62	2,76	2,35	3,40	2,80
Caja	TO	0,31	0,27	0,30	0,34	0,39	0,35	0,32	0,33	0,31
	FV	0,95	0,90	1,00	1,00	0,95	0,95	0,90	1,00	0,95
	TN	0,29	0,24	0,30	0,34	0,37	0,33	0,29	0,33	0,29
Determinación	TO	5,51	5,24	5,10	5,00	5,16	6,00	5,20	5,23	5,47
	FV	1,00	1,00	0,95	0,95	0,90	1,00	0,95	0,95	1,00
	TN	5,51	5,24	4,85	4,75	4,64	6,00	4,94	4,97	5,47
Inspección	TO	7,43	8,53	9,22	8,43	8,33	7,64	7,33	7,76	8,03
	FV	0,95	0,95	1,00	0,95	0,85	0,90	1,00	1,00	0,90
	TN	7,06	8,10	9,22	8,01	7,08	6,88	7,33	7,76	7,23
Atestación	TO	4,34	4,17	4,03	4,21	4,32	4,38	5,06	4,39	4,12
	FV	0,95	0,95	0,90	1,00	1,00	0,90	0,95	0,90	1,00
	TN	4,12	3,96	3,63	4,21	4,32	3,94	4,81	3,95	4,12
Interrupción	TO	1,25	1,00	2,00	0,00	1,12	10,03	2,00	8,52	1,00
	FV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	TN	1,25	1,00	2,00	0,00	1,12	10,03	2,00	8,52	1,00

Tabla 6. Muestras 18-24 (minutos)

Área		18	19	20	21	22	23	24
Selección	TO	4,00	3,27	3,42	3,56	3,36	3,07	3,55
	FV	0,90	0,85	0,70	0,75	0,70	0,65	0,75
	TN	3,60	2,78	2,39	2,67	2,35	2,00	2,66

Caja	TO	0,32	0,40	0,43	0,37	0,36	0,33	0,31
	FV	0,90	1,00	0,95	0,90	0,95	0,95	0,90
	TN	0,29	0,40	0,41	0,33	0,34	0,31	0,28
Determinación	TO	6,10	5,48	4,34	5,38	6,00	5,52	5,60
	FV	0,95	0,85	0,90	0,90	1,00	1,00	0,95
	TN	5,80	4,66	3,91	4,84	6,00	5,52	5,32
Inspección	TO	8,05	8,56	7,32	7,22	7,74	8,40	7,33
	FV	0,95	0,95	0,90	1,00	1,00	0,90	0,90
	TN	7,65	8,13	6,59	7,22	7,74	7,56	6,60
Atestación	TO	4,23	5,10	4,11	4,00	4,30	4,50	4,45
	FV	0,95	0,90	0,95	0,95	0,90	1,00	0,95
	TN	4,02	4,59	3,90	3,80	3,87	4,50	4,23
Interrupción	TO	1,11	0,51	0,48	2,27	1,00	8,24	15,00
	FV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	TN	1,11	0,51	0,48	2,27	1,00	8,24	15,00

Tabla 7. Muestras 25-26 (minutos)

Área		25	26		
Selección	TO	3,19	3,27	63,57	2,45
	FV	0,85	0,80		
	TN	2,71	2,62		
Caja	TO	0,32	0,40	8,46	0,33
	FV	1,00	0,95		
	TN	0,32	0,38		
Determinación	TO	5,60	5,30	130,16	5,01
	FV	0,95	0,90		
	TN	5,32	4,77		
Inspección	TO	9,32	8,43	202,55	7,79
	FV	1,00	1,00		
	TN	9,32	8,43		
Atestación	TO	4,05	4,15	105,81	4,07
	FV	1,00	0,95		
	TN	4,05	3,94		
Interrupción	TO	1,26	1,58	66,71	2,57
	FV	1,00	1,00		
	TN	1,26	1,58		
				Tiempo total	22,20

To: Tiempo observado en minutos.

FV: Factor de valoración

TN: Tiempo normal en minutos ($TN = To \times FV$)

7. *Determinar los suplementos (holguras)*. Teniendo presente que el elemento interrupción fue observado y medido; no es necesario considerarlo como suplemento para la tarea evaluada. Así mismo, dado que se seleccionó un trabajador hábil y experimentado en las operaciones observadas, no se consideró necesarios suplementos por rendimiento. Las operaciones realizadas no requieren esfuerzo físico, como para contemplar suplementos, o por condiciones físicas del lugar de trabajo.

Por lo anterior, se opta usar suplementos que pueden aplicarse uniformemente a los diversos elementos de la tarea evaluada; como lo son las necesidades personales (5%) y fatiga física (4%). Con ello se tiene un suplemento del 9%.

8. *Determinación de tiempo estándar*. El tiempo estándar resulta de adicionar los suplementos al tiempo normal, como se muestra en la ecuación (3). En el presente proyecto se halló el tiempo estándar para el proceso de emisión de certificados de revisión técnico-mecánica y de gases.

$$TE = \frac{TN}{100 - \% \text{suplementos}} \quad (3)$$

$$TE = \frac{22,2}{1 - 0,09}$$

$$TE = 24,4 \text{ minutos}$$

Además, se realiza el cálculo del tiempo estándar para cada elemento, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Tiempo estándar y normal

	Σ	TN	Su	TE
Selección	63,57	2,45	0,09	2,69
Caja	8,46	0,33	0,09	0,36
Determinación	130,16	5,01	0,09	5,50
Inspección	202,55	7,79	0,09	8,56
Atestación	105,81	4,07	0,09	4,47
Interrupción	66,71	2,57	0,09	2,82
	Total	22,20	Total	24,40

Se observa en la Tabla 8 una relación proporcional entre el número de actividades de un elemento y su valor de TE, donde entre mayor sean el número de actividades, mayor será el valor del TE para el elemento. A continuación, se muestra el cálculo del tiempo estándar por observación en la Tabla 9.

Tabla 9. Tiempo estándar y normal de muestras (minutos)

Muestras	1	2	3	4	5
TN	19,65	20,02	20,48	20,08	21,90
Su %	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
TE	19,56	19,93	20,39	19,99	21,81
Muestras	6	7	8	9	10
TN	17,88	19,89	20,75	20,97	21,43
Su %	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
TE	17,79	19,80	20,66	20,88	21,34
Muestras	11	12	13	14	15
TN	22,28	19,71	20,16	29,94	21,71
Su %	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
TE	22,19	19,62	20,07	29,85	21,62
Muestras	16	17	18	19	20
TN	28,93	20,91	22,46	21,07	17,68
Su %	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
TE	28,84	20,82	22,37	20,98	17,59
Muestras	21	22	23	24	25
TN	21,14	21,30	28,13	34,09	22,98
Su %	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
TE	21,05	21,21	28,04	34,00	22,89
Muestras	26				
TN	21,72				
Su %	0,09				
TE	21,63				

2.2 Determinación de cuellos de botella

En la determinación de los cuellos de botella, se calculó un segundo tiempo estándar TE_2 , sin tener en consideración el elemento de interrupciones. Lo anterior debido a que, si bien este elemento estuvo presente en las observaciones, no hacen parte de la tarea específica de emitir el certificado. Este se calculó teniendo en cuenta los datos de la Tabla 10 de tiempo estándar y normal sin interrupciones.

Tabla 10. Tiempo Normal de muestras sin interrupciones

Elementos	Σ	TN	Su	TE
Selección	63,57	2,45	0,09	2,67
Caja	8,46	0,33	0,09	0,35
Determinación	130,16	5,01	0,09	5,46
Inspección	202,55	7,79	0,09	8,49

Atestación	105,81	4,07	0,09	4,44
	Total	19,64	Total	21,4

$$TE_2 = TN * (1 + holgura) = 21,4 \text{ minutos}$$

Posteriormente se hace una revisión de las muestras que se encuentran por encima del segundo tiempo estándar de 21,4 minutos (Tabla 11).

Tabla 11. Muestras con tiempo superior al tiempo estándar mejorado

Muestras	Fecha	Tiempo total
1	09/12/2019	21,76
2	09/12/2019	22,6
3	09/12/2019	21,58
4	09/12/2019	21,51
5	09/12/2019	24,39
6	09/12/2019	21,35
7	09/12/2019	21,86
8	09/12/2019	22,52
9	10/12/2019	22,06
10	10/12/2019	22,81
11	10/12/2019	24,17
12	10/12/2019	21,41
13	10/12/2019	22,6
14	10/12/2019	31,65
15	10/12/2019	23,04
16	11/12/2019	30,23
17	11/12/2019	22,93
18	11/12/2019	23,81
19	11/12/2019	23,32
20	11/12/2019	20,1
21	11/12/2019	22,8
22	11/12/2019	22,76
23	12/12/2019	30,06
24	12/12/2019	36,24
25	12/12/2019	23,74
26	12/12/2019	23,13

Se observa en la Tabla 11 las muestras 23 y 24 con tiempos totales superiores a ambos tiempos estándar. La presencia de estas muestras puede provocar un cuello de botella, acumulándose usuarios en las actividades en los diferentes elementos del proceso de la certificación técnico-mecánica y de gases, al presentar un alto tiempo de certificación. Dado que 5 de las 26 muestras, siendo un 19,2% de muestras, presentan tiempos totales superiores a ambos tiempos estándar, lo cual puede provocar cuellos de botella en los elementos del proceso de certificación de revisión técnico-mecánica y de gases, con base a la frecuencia de llegada de los usuarios.

2.3 Indicadores

Para la evaluación de las mejoras se han implementado los indicadores descritos a continuación, y se ha propuesto una meta para cada indicador [2].

- *Cumplimiento del tiempo estándar del certificado.* Este indicador muestra la relación entre los certificados emitidos con un tiempo menor o igual al tiempo estándar calculado y el total de certificados emitidos. La ecuación (4) describe su cálculo.

$$CTE = \frac{CTE}{CTo} * 100 \quad (4)$$

Donde:

CTE: Certificados emitidos en un tiempo menor o igual a tiempo estándar.

CTo: Total, de certificados emitidos.

Meta: Emitir el 100% de los certificados en un tiempo $\leq 24,2$.

Con base a la Tabla 11 se encuentra que, de las 26 observaciones, 21 tienen un tiempo estándar $\leq 24,2$. Es decir que el 80,8% cumplen con la condición de la meta.

$$CTE = \frac{21}{26} * 100 = 80,8\%$$

- *Cumplimiento del tiempo estándar mejorado.* Este indicador muestra la relación entre los certificados emitidos en un tiempo menor o igual a tiempo estándar mejorado y el total de certificados emitidos. La ecuación (5) muestra su cálculo.

$$TEM = \frac{CTE_2}{CTO} * 100 \quad (5)$$

Donde:

CTE_2 : Certificados emitidos en un tiempo menor o igual a tiempo estándar 2.

CTO : Total, de certificados emitidos.

Meta: Emitir el 100% de los certificados en un tiempo $\leq 21,4$.

$$TEM = \frac{2}{26} * 100 = 7,69\%$$

Con base a la Tabla 11 se encuentra que, de las 26 observaciones, 2 tienen un tiempo estándar $\leq 21,4$. Es decir que el 7,69% cumplen con la condición de la meta.

- *Satisfacción de atención.* Este indicador muestra la relación entre el número de clientes que consideran la atención excelente o buena y el número total de clientes. La ecuación (6) muestra su cálculo.

$$AC = \frac{CS}{CTO} * 100 \quad (6)$$

Donde:

CS : Número de clientes que consideraron la atención excelente o buena.

CTO : Número total de clientes.

Meta: 100% de los clientes satisfechos.

Se lleva a cabo la encuesta de satisfacción de atención, antes y después de la propuesta de mejora. Previo a la implementación de la propuesta de mejora, se encuestaron 32 personas; con ello se obtuvo una satisfacción del cliente del 6,2%, como se muestra en la ecuación (7).

$$AC_p = \frac{CS_p}{CTO_p} * 100 \quad (7)$$

$$AC_p = \frac{20}{32} * 100 = 6,2$$

Donde:

CS_p : Clientes que consideraron la atención excelente o buena, previa implementación de la mejora.

CTO_p : Número total de clientes, previa implementación de la mejora.

Luego de implementar la mejora, se encuestan 31 clientes, con lo cual se obtuvo una satisfacción de cliente del 90,3%, como se muestra en la ecuación (8).

$$AC_f = \frac{CS_f}{CTO_f} * 100 \quad (8)$$

$$AC_f = \frac{28}{31} * 100 = 90,3$$

Donde:

CS_f : Número de clientes que consideraron la atención excelente o buena, posterior a la implementación de la mejora.

$CTof$: Número total de clientes, posterior a la implementación de la mejora.

Con ello se aprecia un aumento en el grado de satisfacción del cliente, tras implementar la propuesta de mejora en los procesos de certificación técnico-mecánica y de gases, del CDA.

- *Satisfacción de tiempo.* Se lleva a cabo la encuesta de satisfacción del tiempo de espera, previo y posterior implementación de la mejora. En las encuestas previa a la mejora, se obtuvo una satisfacción de tiempo del 71,9%, como se muestra en la ecuación (9).

$$ST_p = \frac{CST_p}{CTop} * 100 \quad (9)$$

$$ST_p = \frac{23}{32} * 100 = 71,9$$

Donde:

CST_p : Número de clientes que consideraron el tiempo de espera excelente o buena, previa implementación de la mejora.

$CTop$: Número total de clientes, previa implementación de la mejora.

Meta: 100% de calificaciones buenas o excelentes.

Luego de implementar la mejora, se procede a realizar las encuestas de satisfacción de tiempo de espera, con lo cual se obtuvo una satisfacción del tiempo de 90,3%, como se muestra en la ecuación (10).

$$ST_f = \frac{CST_f}{CTof} * 100 \quad (10)$$

$$ST_f = \frac{28}{31} * 100 = 90,3$$

Donde:

CST_f : Número de clientes que consideraron el tiempo de espera excelente o buena, posterior a la implementación de la mejora.

$CTof$: Número total de clientes, posterior a la implementación de la mejora.

- *Crecimiento en expedición de certificados.* El indicador de crecimiento en la expedición de certificados se denota por la ecuación (11).

$$CEC = \left(\frac{CM}{CMA} - 1 \right) * 100 \quad (11)$$

$$CEC = \left(\frac{1082}{726} - 1 \right) * 100 = 49,04$$

Donde:

CM : Número de certificados emitidos en el mes.

CMA : Número de certificados emitidos en el mes pasado.

Meta: 10% de crecimiento por mes.

La implementación de la mejora se lleva a cabo en el mes de febrero de 2020, por ello se toma registros de la expedición de certificados en el mes de enero y febrero de 2020. En la Tabla 12 se muestra el registro de los certificados expedidos en enero, y en la Tabla 13 se muestra el registro de febrero.

Con la ecuación (11) se obtiene la tasa de crecimiento de expedición de certificados, con base al mes de enero y febrero de 2020 en el CDA, con lo cual se obtiene una tasa de crecimiento del 49,04. Es de aclarar que en la tasa de crecimiento de emisión de certificados se encuentran variantes socio económicas, que pueden afectarla positiva o negativamente.

Tabla 12. Muestreo enero

Fecha	Inicial (ID asociado)	Final (ID asociado)	Total
01/01/2020	0	0	0
02/01/2020	44840807	44840828	22
03/01/2020	44840829	44840870	42
04/01/2020	44840871	44840905	35
05/01/2020	0	0	0
06/01/2020	0	0	0
07/01/2020	44840906	44840927	22
08/01/2020	44840928	44840958	31
09/01/2020	44840959	44840988	30
10/01/2020	44840989	44841019	31
11/01/2020	44841020	44841052	33
12/01/2020	0	0	0
13/01/2020	44841053	44841089	37
14/01/2020	44841090	44841110	21
15/01/2020	44841111	44841140	30
16/01/2020	44841141	44841168	28
17/01/2020	44841169	44841201	33
18/01/2020	44841202	44841234	33
19/01/2020	0	0	0
20/01/2020	44841235	44841265	31
21/01/2020	44841266	44841283	18
22/01/2020	44841284	44841312	29
23/01/2020	44841313	44841333	21
24/01/2020	44841334	44841360	27
25/01/2020	44841361	44841397	37
26/01/2020	0	0	0
27/01/2020	44841398	44841426	29
28/01/2020	44841427	44841445	19
29/01/2020	44841446	44841473	28
30/01/2020	44841474	44841502	29
31/01/2020	44841503	44841532	30
Total de certificados			726

Tabla 13. Muestreo febrero

Fecha	Inicial	Final	Total
01/02/2020	44841533	44841569	37
02/02/2020	0	0	0
03/02/2020	44841570	44841607	38
04/02/2020	44841608	44841643	36
05/02/2020	44841644	44841682	39
06/02/2020	44841683	44841735	53
07/02/2020	44841736	44841784	49
08/02/2020	44841785	44841846	62
09/02/2020	0	0	0
10/02/2020	44841847	44841889	43
11/02/2020	47414634	47414687	54
12/02/2020	47414689	47414749	61
13/02/2020	47414750	47414815	66
14/02/2020	47414816	47414872	57
15/02/2020	47414873	47414931	59
16/02/2020	0	0	0
17/02/2020	47414932	47414982	51
18/02/2020	47414983	47415044	62
19/02/2020	47415045	47415088	44
20/02/2020	47415089	47415118	30
21/02/2020	47415119	47415142	24

22/02/2020	47415143	47415175	33
23/02/2020	0	0	0
24/02/2020	47415176	47415209	34
25/02/2020	47415210	47415238	29
26/02/2020	47415239	47415264	26
27/02/2020	47415265	47415300	36
28/02/2020	47415301	47415330	30
29/02/2020	47415331	47415359	29
Total certificados			1082

Se propone la evaluación de estos indicadores mensualmente, con la finalidad de proponer futuras mejoras y detectar falencias en los procesos.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Propuesta de mejoramiento

Se procede a simular en la herramienta ProModel, las mejoras en los tiempos tras eliminar las interrupciones en el proceso de la revisión técnico-mecánica y de gases de CDA. Promodel está diseñado para modelamiento de sistemas de fabricación que van desde pequeños talleres de trabajo y las células de mecanizado a gran escala de producción y los sistemas de fabricación flexibles. Los elementos básicos de modelado en Promodel son: locaciones, entidades, llegadas y procesos. Las locaciones representan lugares fijos en el sistema; cualquier cosa que un modelo puede procesar se llama una entidad. El mecanismo para definir cómo las entidades entran en el sistema se llama llegadas.

El procesamiento describe las operaciones que tienen lugar en una locación, como la cantidad de tiempo que una entidad pasa allí, los recursos que necesita para completar el proceso; Promodel incluye otros elementos, como la red de caminos, atributos, variables, nodos asociados a los recursos [1]. ProModel se centra en la utilización de recursos, la producción, la capacidad, la productividad, los niveles de inventario, cuellos de botella, tiempos de producción y otras medidas de rendimiento [1]. En la Figura 1 se observa el modelado del proceso de la revisión técnico-mecánica y de gases. Se observan las 5 etapas del proceso: selección, caja, determinación, inspección y atestación.

1. *Locaciones*: En esta se tiene las etapas de proceso: Entrada, Selección, Caja, Determinación, Inspección, Atestación y Salida. En Promodel se identifica con la Figura 1.



Figura 1. Locaciones

2. *Entidades*: Se tiene el cliente, y se identifica con la Figura 2.



Figura 2. Entidades

3. *Recursos*: Se tiene el Operario, y se identifica con la Figura 3.



Figura 3. Recursos

Los cuadros azules en la Figura 4, muestran la cantidad de usuarios que han pasado por cada etapa del proceso de certificación de la revisión técnico-mecánica y de gases; los cuales resultan de utilidad en la identificación de cuellos de botella.

Figura 4. Esquema de simulación en Promodel

Al tener definidos las locaciones, entidades y recursos, se procede a simular el proceso de certificación. En el programa Promodel, se lleva a cabo la simulación con las interrupciones y sin estas, con frecuencias de llegada del usuario de 1 minuto, 2 minutos y 5 minutos.

3.1.1 Simulación en Promodel 1

El proceso tiene como parámetro la llegada de un usuario cada minuto, y se simula una hora. Se observa un cuello de botella en la etapa de selección, como se muestra en la Figura 5. En la etapa de caja, determinación y atestación, donde se aprecia el paso de un número de usuarios de una forma uniforme. El cuello de botella en selección se debe a interrupciones generadas por inadecuado manejo de tiempo del operario, ello se ratifica en la Tabla 14. La etapa de inspección presenta un cuello de botella, lo cual es debido al minucioso proceso de inspección del estado de la motocicleta.

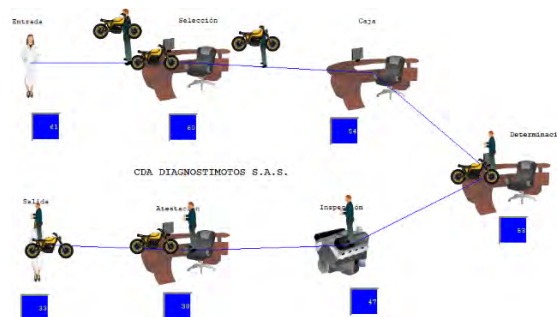


Figura 5. Simulación con interrupciones a frecuencia de 1 minuto

Tabla 14. Simulación con interrupciones a frecuencia de 1 minuto

Etapa	Usuarios
Selección	4
Caja	1
Determinación	5
Inspección	9
Atestación	5

Se procede a eliminar las interrupciones producidas en la etapa de Selección en la simulación. Con ello se observa una disminución en el cuello de botella en la etapa, como se muestra en la Figura 9 y la Tabla 15 en la cantidad de usuarios que han pasado por cada etapa.

Tabla 15. Simulación sin interrupciones a frecuencia de 1 minuto

Etapa	Usuarios
Selección	3
Caja	1
Determinación	6
Inspección	9
Atestación	5

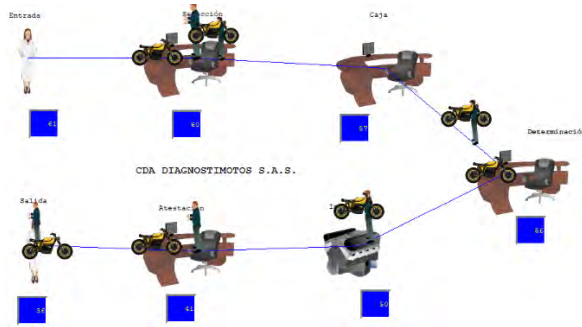


Figura 6. Simulación sin interrupciones a frecuencia de 1 minuto

Al comparar la Tabla 14 y 15, se observa una disminución en la cantidad de usuarios en Selección, de 4 usuarios a 3 usuarios al eliminar las interrupciones, con lo cual se ha logrado mitigar el cuello de botella que se estaba generando en esta etapa del proceso.

3.1.2 Simulación en Promodel 2

El proceso tiene como parámetro la llegada de un usuario cada 2 minutos, y se simula una hora. Se lleva a cabo la simulación con las interrupciones, se observa un cuello de botella en la etapa de selección, como se muestra en la Figura 7. En la etapa de caja, determinación y atestación, donde se aprecia el paso de un número de usuarios de una forma uniforme. La etapa de inspección presenta un cuello de botella debido a proceso minucioso de revisión de la motocicleta, como se muestra en la Tabla 16.

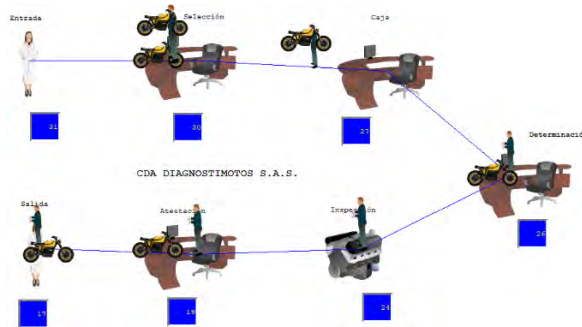


Figura 7. Simulación con interrupciones a frecuencia de 2 minutos

Tabla 16. Simulación con interrupciones a frecuencia de 2 minutos

Etapa	Usuarios
Selección	3
Caja	1
Determinación	2
Inspección	5
Atestación	2

Se procede a eliminar las interrupciones en la simulación, y con ello se observa una disminución en el cuello de botella en la etapa de selección, en el paso de usuarios como se muestra en la Figura 8 y en la Tabla 17.

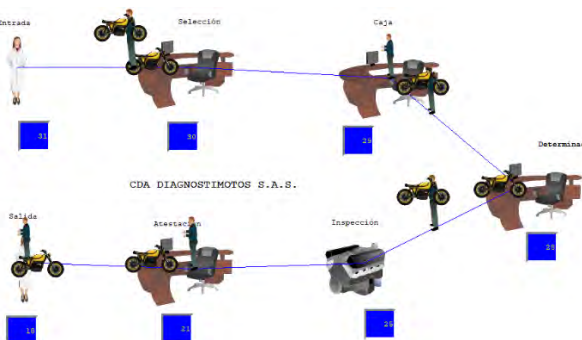


Figura 8. Simulación sin interrupciones a frecuencia de 2 minutos

Tabla 17. Simulación sin interrupciones a frecuencia de 2 minutos

Etapa	Usuarios
Selección	1
Caja	1
Determinación	3
Inspección	3
Atestación	3

Al comparar la Tabla 16 y 17, se observa una disminución en la cantidad de usuarios en Selección, de 3 a 1 usuario al eliminar las interrupciones, con ello se mitiga el cuello de botella presente en esta etapa.

3.1.3 Simulación en Promodel 3

El proceso tiene como parámetro la llegada de un usuario cada 5 minutos, y se simula una hora. Se lleva a cabo la simulación con las interrupciones, se observa un cuello de botella en la etapa de inspección, debido al proceso minucioso de revisión de la motocicleta, como se muestra en la Figura 9 y la Tabla 18.

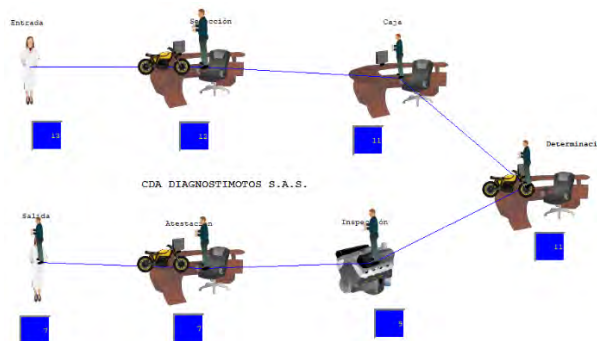


Figura 9. Simulación con interrupciones a frecuencia de 5 minutos

Tabla 18. Simulación sin interrupciones a frecuencia de 2 minutos

Etapa	Usuarios
Selección	1
Caja	0
Determinación	2
Inspección	2
Atestación	0

Se procede a eliminar las interrupciones en la simulación, se observa el mismo flujo de usuarios, como se muestra en la Figura 10 y en la Tabla 19.

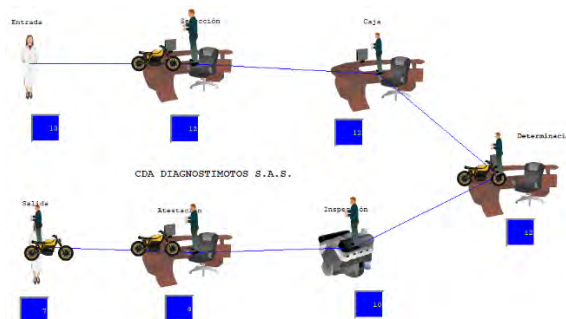


Figura 10. Simulación sin interrupciones a frecuencia de 5 minutos

Tabla 19. Simulación sin interrupciones a frecuencia de 2 minutos

Etapa	Usuarios
Selección	0
Caja	0
Determinación	2
Inspección	2
Atestación	1

3.1.4 Comparación de resultados

Al comparar los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones con las interrupciones con una frecuencia de llegada del usuario de 1 minuto, 2 minutos y 5 minutos; resalta el cuello de botella en el área de selección, como se muestra en la Figura 11. Además, se observa un cuello de botella en el área de inspección, debido a que el operario debe llevar su labor de forma minuciosa en la revisión del estado del vehículo.

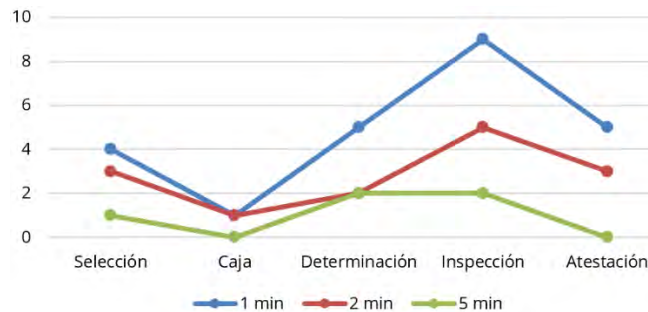


Figura 11. Comparación con interrupciones

Al implementar la mejora, eliminando las interrupciones generadas en el área de selección, tal como tiempo de ocio del operario y actividades no relacionadas con el área, se observa una disminución en el cuello de botella, como se muestra en la Figura 12.

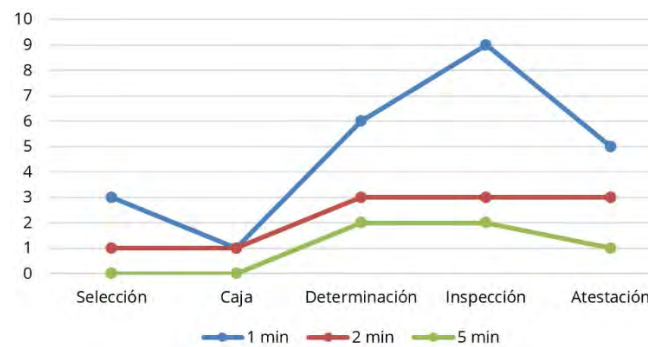


Figura 12. Comparación sin interrupciones

3.2 Costos de implementación de la propuesta

En el CDA se propone definir las actividades del operario propias del elemento de selección, excluyendo actividades de ocio y subtareas no correspondientes a su labor. Además, de establecer un turno especial para atención al cliente, con la finalidad de resolver dudas, reclamos y quejas, del proceso de certificación técnico-mecánica y de gases, lo cual se puede llevar a cabo de manera rotativa con el personal del CDA, como se muestra en la Tabla 20 a manera de ejemplo, donde diariamente un operario es asignado en un determinado horario, en la atención al cliente. Con ello se disminuirá en el elemento de selección, interrupciones y actividades no propias del elemento.

Tabla 20. Turnos rotativos de atención al cliente

Operario	Fecha
1	1-02-2021
2	2-02-2021
3	3-02-2021
4	4-02-2021
5	5-02-2021
6	6-02-2021
7	7-02-2021
8	8-02-2021
9	9-02-2021
10	10-02-2021

Como costo de implementación, se tiene las horas extras del supervisor encargado, quien definirá las actividades propias del personal del elemento de selección, y quien llevará a cabo el control de los turnos rotativos en la atención al cliente. El costo por hora extra es definido por el CDA, con base al salario mínimo legal vigente.

4. CONCLUSIONES

Con la caracterización del CDA se identificaron las diferentes áreas que componen el proceso de RTMyEC: selección, caja determinación, inspección y atestación que componen el proceso de certificación de revisión técnico-mecánica y de gases contaminantes; además de las actividades dentro de cada área, el personal involucrado en estas, la estructura organizacional de la empresa y el flujo de trabajo.

Se obtuvo un tiempo normal promedio de 22,20 minutos de las 26 muestras y una vez establecidas las holguras (9%), se determinó el tiempo estándar con un valor de 24,2 minutos, una vez obtenidos estos valores se calculó el segundo tiempo estándar de 21,4 minutos, este sin tener en consideración las interrupciones, si bien este elemento estuvo presente en las observaciones no hacen parte de la tarea lo cual se reduce el proceso de RTMyEC en 2,8 minutos.

Se realizó la simulación del proceso con interrupciones con frecuencia de usuarios cada 1, 2 y 5 minutos, encontrando un cuello botella en el área de selección a diferencia de las demás áreas, donde hay un flujo de usuarios uniforme a la tarea, también se simuló el proceso con la misma frecuencia en minutos esta vez sin interrupciones que son generadas en el área de selección y se observa una disminución en el cuello botella donde se puede notar la mejora del proceso.

REFERENCIAS

- [1] Bernal M. et al. (2016). Productividad en una celda de manufactura flexible simulada en promodel utilizando path networks type crane. *Tecnura* 114(1), 133-144.
- [2] García D. (2015). Propuesta de mejoramiento mediante el estudio del trabajo para el proceso de revisión técnico-mecánica y de emisiones contaminantes en el CDA La Playa Cali. Universidad Autónoma de Occidente.

Dinámica de sistemas y sus aplicaciones en logística urbana

Claudia Milena Gómez Zuluaga¹

Luis Alberto Rivera Martínez²

Andrés Rey Piedrahita³

Unidad Central del Valle del Cauca

Colombia

El crecimiento poblacional generado en las últimas décadas se ha concentrado principalmente en las áreas urbanas, ocasionando demanda de productos y servicios por parte de los habitantes. Esta situación ha llevado a una mayor concentración de actividades en algunas áreas específicas de las ciudades, con la consiguiente alteración y desafío para la logística urbana. En este capítulo se hace un recorrido alrededor de la aplicación de la metodología Dinámica de Sistemas DS, analizando el potencial que brinda para comprender y abordar problemas de logística urbana, a través del uso de modelos matemáticos e informáticos, que permitan crear simulaciones de sistemas reales incorporando las variables relevantes del problema objeto de estudio, como congestión vehicular, organización de soluciones medioambientales y distribución de espacios urbanos.

¹ Contador Público, Especialista en Negocios Internacionales y Magíster en Logística Integral.

Contacto: cmgomez@uceva.edu.co

² Arquitecto y Magíster en Educación Ambiental y Desarrollo Sostenible.

Contacto: lriviera@uceva.edu.co

³ Doctor en Ingeniería.

Contacto: arey@uceva.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de la teoría general de los sistemas en logística urbana LU, plantea que para estudiar las ciudades y las instituciones es necesario una observación integrada u holística [1], por lo que el desarrollo de diferentes estrategias y modelos logísticos relacionados con transporte de mercancías y direccionamiento logístico de las ciudades [2], ha sido de gran interés para los investigadores, debido a un rápido crecimiento en la población en general y de los centros urbanos en particular en todas las regiones del mundo.

Esto hace necesario comprender cómo se pueden alterar los ecosistemas desde y para las ciudades [3] y consiguientemente cómo utilizar la tecnología para la aplicación de herramientas de modelación que solucionen los problemas relacionados con estos temas [4], utilizando las matemáticas como fundamento resolutivo.

En este camino se encuentra la dinámica de sistemas DS, que permite por medio de un software, diseñar simulaciones, con la posibilidad de analizar el comportamiento y las inferencias de las interrelaciones que existen dentro de los componentes de un sistema, en un periodo determinado, convirtiéndose entonces en una herramienta de gran ayuda para la creación de modelos en la manifestación de fenómenos sociales que intervienen en la LU, por lo que utiliza diferentes variables para su propósito, tomando en cuenta que toda vez que en los sistemas se encuentran inmersos una gran variedad de elementos que se relacionan entre sí [5].

La DS se reconoce como un elemento fundamental de la Teoría General de Sistemas TGS por ser considerada una metodología que permite entender los cambios en entornos complejos. Vale la pena mencionar que la TGS es considerada una ciencia recién desde el siglo XX, aunque sus concepciones filosóficas datan hace tres siglos con el planteamiento de Hegel y van evolucionando gracias a los aportes teóricos generados por Von Bertalanffy, que permitieron que en último siglo se considere como una ciencia formal.

La teoría nace con la percepción de la interrelación de elementos [6], o un conjunto de partes que trabajan para lograr un objetivo común que se define a la DS como una metodología que al emplear ecuaciones en diferencias finitas o diferenciales ayudan a entender los cambios dentro de un sistema [5] a través de las conductas académicas habituales de los matemáticos, como el análisis y la comparación de los supuestos y los modelos mentales acerca de cómo funcionan las cosas.

La metodología de DS, es en especial apropiada para brindar un pensamiento sistémico y se maneja en entornos complejos y difícilmente definidos, en donde existen elementos relacionados, de los cuales hay incertidumbre de comportamiento en el tiempo. Además, tiene como particularidad la conjugación del análisis cualitativo y cuantitativo en la investigación [7].

El objetivo básico de la DS como herramienta de construcción de modelos de simulación es, entender las causas del comportamiento de los elementos que se involucran en ese modelo, y permite hacerlo en un periodo de tiempo amplio, permitiendo de este modo observar cambios en su evolución [5] es así como uno de los problemas abordados con esta metodología, es el relacionado a la LU, definida desde un contexto de ciudad logística y observada como un ecosistema [8], formado por partes interesadas que intervienen con objetivos, reglamentaciones y restricciones de acceso diferentes y propias [8, 9].

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Los sistemas

El término *sistema* es en gran parte polisémico, puesto que se emplea en cualquier tipo de contextos [9] por lo que es de suma importancia precisar su definición, para comprender su aplicación. Se reconoce al *sistema*, como el conjunto de componentes enlazados entre sí, y que funcionan como un todo en base a las conexiones existentes entre sus partes [10]. Se considera también, como un objeto formado por la unión

de varias piezas que se relacionan entre sí de alguna manera y que están articuladas como una unidad, ésta última definición ha sido utilizada en diferentes escenarios, como en el campo de la medicina, administración, economía, etc. [11].

Del mismo modo, se debe comprender que, dentro de los *sistemas*, los elementos no cumplen las mismas funciones, porque no existe similitud entre ellos, es decir que se relacionan de forma diferente entre sus partes, por tanto, algunos tendrán mayor profundidad e importancia dentro del contexto en el que se están relacionando, definiendo de una manera más clara cuales elementos son relevantes y cuáles no [5].

Ahora bien, para evidenciar la estructura y las causas reales de la forma en que se comporta un sistema y los problemas que pueden existir dentro de él, es necesario estudiar las relaciones que se dan entre las partes que lo constituyen., por tanto, es indispensable identificar que dentro de los tipos de sistemas que se encuentran hay unos factores que son denominados claves, otros limitativos y otros inactivos, que irán a definir el comportamiento de los componentes. Un factor clave, por tanto, es aquel que tiene mayor fuerza e influencia dentro del sistema y que permanece a lo largo del tiempo, este tipo de factor cuando se identifica, puede servir para conseguir los cambios que se desean, sin embargo, en algunas ocasiones no son tomados en cuenta o no son relacionados con el problema y esto hace que no se puedan realizar mejoras con cambios pequeños utilizándolos [5, 11].

Tomando en cuenta lo anterior, se puede deducir que en ocasiones examinar un problema basado en la capacidad de análisis del ser humano, no es la mejor forma para encontrar el factor clave, por lo que el uso de modelos como los que se realizan con la DS, permite visualizar los elementos que podrían influir en el comportamiento del esquema e identificarlos.

De la misma manera, la definición del factor limitativo está relacionado como su nombre lo indica, con la restricción que este elemento ejerce en el crecimiento del sistema, y se convierte, por tanto, en un factor dinámico, a pesar de que es único en cada momento. Así pues, este factor puede aparecer varias veces en el sistema y ser considerado como un nuevo problema.

Por otro lado, están los factores inactivos, que son precisamente aquellos cuyos elementos parecieran no cumplir ninguna función dentro del sistema y la única forma de identificarlos será compararlos con otros entornos similares que no tengan ese componente [11].

Entonces la importancia en la observación del comportamiento de las partes en el contexto es fundamental para identificar estos factores y así eliminar piezas que sean consideradas como inactivas, emitir mejoras para las que lo limiten y tomar decisiones correctas para aquellas que son claves.

2.2 Dinámica de sistemas DS

La evolución de la sociedad y el modernismo están ligados a la tecnología, esto permite entender que los problemas abordados en los diferentes ambientes, desde los métodos tradicionales no son suficientes, ya que la complejidad impone conductas de naturaleza holística o de estructuras, haciéndose necesario pensar en la probabilidad de resolverlas otorgando una mayor optimización y eficiencia con costos reducidos. Así pues, el uso de computadoras u otras tecnologías que permiten ir más allá de las respuestas que un especialista matemático pueda dar, son necesarias para lograr la solución en una red de interrelaciones complejas, y es así como el hardware y el software de una computadora son utilizados para estos fines [9]. De esta manera, el ser humano puede utilizar la capacidad que tienen estos dispositivos, introduciendo en ellos la percepción que se tiene de la realidad, facilitando la visualización de aspectos críticos y posibles soluciones a estos [10].

2.2.1 Aplicación de la dinámica de sistemas

La DS en un inicio fue utilizada para resolver el problema de una línea de producción, debido a los cambios que se presentaban en demoras de información, el método utilizado para resolver el problema se llamó dinámica industrial (DI), que a partir de los años 60 fue percibido como un modelo de aplicación útil no solo

en la industria sino también aplicable a áreas urbanas, para después evolucionar a múltiples campos como los socioeconómicos, sociológicos, medioambientales, recursos energéticos, entre otros [11].

Existen varias investigaciones reportadas con la DS, algunos de ellos relacionados con temas de medicina en centros de control de enfermedades infecciosas y endémicas en China, en los cuales se observan aparentes intervenciones con mayor eficacia en el control de enfermedades, con aparente incremento en el nivel de inversión gubernamental en productos de salud pública [12]; o estudios en los cuales se analizan las influencias de las políticas sanitarias en las demandas reales de pacientes que no tienen acceso a la atención médica concluyéndose mostrándose que la disminución del número de hospitales, o el aumento del número de puestos de salud o instituciones de atención primaria elevaría la proporción de la compensación por los seguros de salud lo que llevaría a un incremento de la transformación de la demanda médica [13]; también se evidencia que esta técnica puede ser utilizada en temas de robótica, como en el caso de una simulación en el rendimiento de un modelo de control sin cable, realizando comparaciones y evaluando la eficacia de un modelo sobre otro [14].

2.2.2 Dinámica de sistemas y logística urbana

Para encontrar la relación que existe entre la DS y la LU, es necesario hacer referencia a la teoría de sistemas, en donde las ciudades y sus componentes deben ser estudiados como un todo, ya que los actores que intervienen en el sistema están relacionados entre sí [15].

La LU se encuentra dentro de un contexto de ciudad logística CL, como un ecosistema en donde intervienen algunas partes interesadas, que tienen objetivos, operaciones de entrega, reglas, restricciones en el acceso a centros urbanos propios y diferentes que se constituyen en una forma de sistema [16-18]. Un problema especial que presenta la LU hace referencia a las partes del sistema que están representadas por actores públicos y privados, quienes se ven afectados constantemente en las decisiones que se toman frente a situaciones relacionadas con la movilidad, tanto de pasajeros como de mercancías, ya que estas actividades llevan a la congestión, al consumo de energía y ocasionan un daño medioambiental [19-23], por tanto los problemas que se presentan en las ciudades forman parte de la TGS por ser considerada como un entorno complejos.

Otra situación que emerge en este contexto es la congestión de tráfico en las ciudades, generada por el asentamiento de la población en zonas urbanas, lo cual ocasiona un aumento en los accidentes de tránsito, los costos derivados de la contaminación del aire, incremento en la generación de ruido y cambios en el macro y microclima, por lo que para contribuir a la solución de estos conflictos, es necesario tener planes y políticas adecuadas [23, 24], que pueden desarrollarse con escenarios simulados dentro de la DS.

Un desafío adicional que surge en temas de urbanismo está relacionado con la movilidad de pasajeros, debido a que la circulación del flujo de personas debe ser eficaz [25], por tanto, para lograr una optimización de este proceso es indispensable contar con una adecuada infraestructura formada por carreteras que no generen colapsos a la hora de efectuar estos traslados y así lograr disminuir los inconvenientes que puedan tener los usuarios [26]. Otros retos presentados en LU, que necesitan metodologías para conseguir soluciones acertadas, son los referentes a los temas relacionados con el desarrollo sostenible de las economías en las regiones, debido a la relación directa que hay con la distribución de los recursos y la apuesta por el progreso social, la estabilidad medioambiental y el crecimiento económico [12].

Es así como la utilización de la DS tiene una relación estrecha con la LU siendo una herramienta con grandes beneficios para la solución de los diferentes problemas, esto es debido a la cantidad de parámetros difíciles de cuantificar que aparecen en estos entornos, y que solo podría ser visualizable construyendo modelos, que permitan por medio de un computador lograr un diseño en el que se pueda introducir la información con datos matemáticos, aplicar esta herramienta y visualizar su proyección en el futuro [11].

Diferentes autores han investigado temas relacionados con las problemáticas presentadas en LU planteando escenarios futuros por medio de la herramienta de DS, esto ha permitido evidenciar que uno de los principales retos que tienen las ciudades hoy son los enmarcados en cuestiones medioambientales

que se ven referenciados en esos trabajos. Algunos ejemplos a mencionar son aquellos utilizados para la búsqueda de soluciones en el tema de contaminación medioambiental con uso compartido de automóviles modelado en un marco propuesto mediante el uso de bucle causal [27]; de igual manera, la evaluación que se realiza para los responsables de los gases de efecto invernadero proponiendo un proceso de eliminación de residuos en escala en la ciudad de Beijing con un modelo dinámico [20].

Por otro lado, se encuentran estudios relacionados con la distribución y transporte, en un primer caso para productos regionales basados en datos cuantitativos que permiten tomar las decisiones con los usuarios por medio de una interfaz gráfica [28]; así como el desarrollo de una planificación de transporte urbano que incluye la mitigación de la congestión a través de la gestión de la demanda para mejorar la movilidad urbana en el transporte público [29]; o el análisis del transporte ferroviario para carga que identifica posibles alternativas en mejora frente al tráfico y los accidentes urbanos [30].

La sostenibilidad también es nombrada en investigaciones sobre el tema, como aquella que analiza el impacto del sistema de logística subterránea en el desarrollo urbano sostenible, basándose en la simulación de un mundo real, y estudiando la relación cuantitativa entre la estrategia de implementación de Sistema Logístico Subterráneo ULS, o la sostenibilidad del transporte urbano [31]. Existen otros aspectos manejados como lo son las políticas basadas en centros de distribución dentro de las ciudades [32] la revisión de vehículos eléctricos [33] o la adaptabilidad urbana en Beijing para administradores y planificadores urbanos [34].

Es importante nombrar otros temas catalogados dentro de la industria 4.0 basada en inteligencia artificial, realidad aumentada, sistemas dinámicos y realidad virtual, además de los pronósticos según la rotación del stock residencial urbano por medio de construcción de edificios y demoliciones [35].

3. CONCLUSIONES

Los modelos desarrollados con Dinámica de Sistemas son altamente utilizados para visualizar problemas en contextos que son definidos como complejos, dentro de los que se encuentran los relacionados con la Logística Urbana, ya que está formada por diferentes actores y variables que se relacionan incidiendo en las soluciones que se deben de dar en las diferentes situaciones.

El análisis que permite la Dinámica de Sistemas desde enfoques reales para crear posibles escenarios en el futuro es de gran ayuda para la toma de decisiones y el mejoramiento de las ciudades, que han presentado un incremento en la población y en la demanda de sus habitantes

Por otro lado, la aplicación en los diferentes contextos para dar respuesta a diversas cuestiones muestra la importancia que tiene esta herramienta, dado la extensa aplicación que mostró las investigaciones en el área de interés urbanístico utilizando entornos simulados.

Es importante destacar que el análisis que se realizó estuvo enfocado en mostrar el potencial Dinámica de Sistemas para comprender y abordar problemas de Logística Urbana, la cual presenta grandes retos en el futuro, pues de ella se desprenden una gran cantidad de factores que influyen positiva o negativamente en la población.

REFERENCIAS

- [1] Carvalho N. et al. (2019). Urban distribution centres in historical cities from the perspective of residents, retailers and carriers. *Research in Transportation Economics* 77, 100744.
- [2] Muñoz A. et al. (2017). Impact of the use of electric vehicles in collaborative urban transport networks: A case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 50, 40-54.
- [3] Bai X. (2018). Advance the ecosystem approach in cities. *Nature* 559(7712), 7-8.
- [4] Grazia E. (2018). Trends in transportation and logistics. *European Journal of Operational Research* 264(3), 830-836.
- [5] Forrester J. (1971). *World Dynamics*. Norwalk. Productivity Press.

- [6] Bertalanffy L. (1976). *Teoría general de los sistemas*. Fondo de Cultura Económica.
- [7] Dong J. et al. (2019). The impact of underground logistics system on urban sustainable development: A system dynamics approach. *Sustainability* 11(5), 1-21.
- [8] Lagorio A. et al. (2017). Urban Logistics Ecosystem: A system of system framework for stakeholders in urban freight transport projects. *IFAC-PapersOnLine* 50(1), 7284-7289.
- [9] Bertalanffy L. (1982). *Perspectivas en la teoría general de sistemas*. Alianza Editorial.
- [10] García J. (2019). *Ciencias de la complejidad: Teoría General de Sistemas, Pensamiento Sistémico y sus aplicaciones prácticas*.
- [11] Aracil J. y Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas*. Alianza editorial.
- [12] Wei W. et al. (2018). Overview of logistics equilibrium distribution networks system: An urban perspective. En XI International Conference and Satellite Workshops. Melbourne. Australia.
- [13] Yu W. et al. (2015). Transformation of potential medical demand in China: A system dynamics simulation model. *Journal of Biomedical Informatics* 57, 399-414.
- [14] Ren B. et al. (2019). A novel robust finite-time trajectory control with the high-order sliding mode for human-robot cooperation. *IEEE Access* 7, 130874-130882.
- [15] Arango S. et al. (2012). Collaborative autonomous systems in models of urban logistics. *Dyna* 79(172), 171-179.
- [16] Lagorio, A., Pinto, R., & Golini, R. (2016). Research in urban logistics: a systematic literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 46(10), 908-931.
- [17] Macharis C. et al. (2011). *City distribution and urban freight transport: multiple perspectives*. Edward Elgar Publishing.
- [18] Taniguchi E. et al. (2020). Modelling city logistics using recent innovative technologies. *Transportation Research Procedia* 46, 3-12.
- [19] Cimini C. et al. (2020). Smart logistics and the logistics operator 4.0. *IFAC-PapersOnLine* 53(2), 10615-10620.
- [20] Lu C. et al. (2020). The GHG emission determinants research for waste disposal process at city-scale in Baoding. *Sustainable Cities and Society* 59, 102203.
- [21] Katsela K. y Pålsson H. (2019). A multi-criteria decision model for stakeholder management in city logistics. *Research in Transportation Business & Management* 33, 100439.
- [22] Fatnassi E. et al. (2015). Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics. *Transportation Research Part B: Methodological* 81, 440-460.
- [23] Nocera S. et al. (2021). How to evaluate and plan the freight-passengers first-last mile. *Transport policy* 113, 56-66.
- [24] Amaya J. et al. (2020). Stakeholders perceptions to sustainable urban freight policies in emerging markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 132, 329-348.
- [25] Cardoso D. et al. (2020). Improvement in the Detection of Passengers in Public Transport Systems by Using UHF RFID. *International Journal of Wireless Information Networks* 27(1), 116-132.
- [26] Kongot, A. y Pattanaik M. (2017). Empowering project managers in enterprises-A design thinking approach to manage commercial projects. En 13 International Conference on Human-Computer Interaction. Mumbai, India.
- [27] Esfandabadi Z. et al. (2020). Conceptualizing environmental effects of carsharing services: A system thinking approach. *Science of The Total Environment* 745, 141169.
- [28] Lagarda E. et al. (2020). Dynamic model and graphical user interface: A solution for the distribution process of regional products. *Applied Sciences* 10(13), 4481.
- [29] Suryani E. et al. (2020). System dynamics simulation model for urban transportation planning: a case study. *International Journal of Simulation Modelling* 19(1), 5-16.
- [30] Hu W. et al. (2020). Using system dynamics to analyze the development of urban freight transportation system based on rail transit: A case study of Beijing. *Sustainable Cities and Society* 53, 101923.
- [31] Fioravanti R. y Lima O. (2019). Model for ex-ante analysis of city logistics policies based on urban distribution centers: an approach using system dynamics. *Urbe* 11, 1-22.
- [32] Liu D. y Xiao B. (2018). Exploring the development of electric vehicles under policy incentives: A scenario-based system dynamics model. *Energy Policy* 120, 8-23.
- [33] Kang S. et al. (2020). System dynamics model for the improvement planning of school building conditions. *Sustainability* 12(10), 4235.
- [34] Ferreira W. et al. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering* 149, 106868.
- [35] Zou X. et al. (2020). Evaluation and analysis of urban logistics competitiveness and spatial evolution. *International Journal of Logistics Research and Applications* 23(5), 493-507.

Diseño de un sistema de conteo vehicular automático a través de visión por computador

Fredy Nocua Mesa¹
Daniel Albarracín Sepúlveda²
Diego Pita Pedraza³
Fundación Universitaria de San Gil
Colombia

Los estudios de aforo vehicular son importantes para el adecuado diseño de las vías urbanas, pero uno de los principales problemas es la falta de automatización en los procesos de adquisición de datos, tales como volumen de tráfico, tipo de vehículo, velocidad y dirección. Dentro de las causas identificadas están los efectos perjudiciales del cansancio o el aburrimiento de los aforadores, el riesgo del personal aforador apostado en las vías y la limitación de los puntos de análisis debido a los costos en personal o en instalación de equipos. Debido a esto se plantea diseñar un sistema de conteo vehicular automático y de bajo costo, focalizado en el municipio de Yopal, Colombia. Se realizará con técnicas de visión por computador y se emplearán algoritmos de sustracción de fondo.

¹ Ingeniero Electrónico.

Contacto: fnocua@unisangil.edu.co

² Ingeniero Electrónico.

Contacto: dalbarracin@unisangil.edu.co

³ Ingeniero Electromecánico.

Contacto: dpita@unisangil.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Según el portal Traffic Index, aplicación que utiliza los datos de tráfico de Google Maps, en su publicación Worldwide Traffic Congestion Ranking muestra que Bogotá es una de las once ciudades más congestionada a nivel mundial, después de ciudad de México, Lima y Sao pablo [1]. En general Colombia, según datos del Ministerio de Transporte, ha venido presentando un aumento anual sostenido del 6% en la cantidad de vehículos en circulación en los últimos cinco años. En 2017 circulaban cerca de 13 millones de vehículos y ha aumentado a más de 17 millones de vehículos a junio de 2022 [2], como se ve en la Figura 1. En la actualidad, la mayoría de las ciudades del mundo se enfrentan a diversos problemas de movilidad provocados por el aumento en el número de vehículos en circulación.

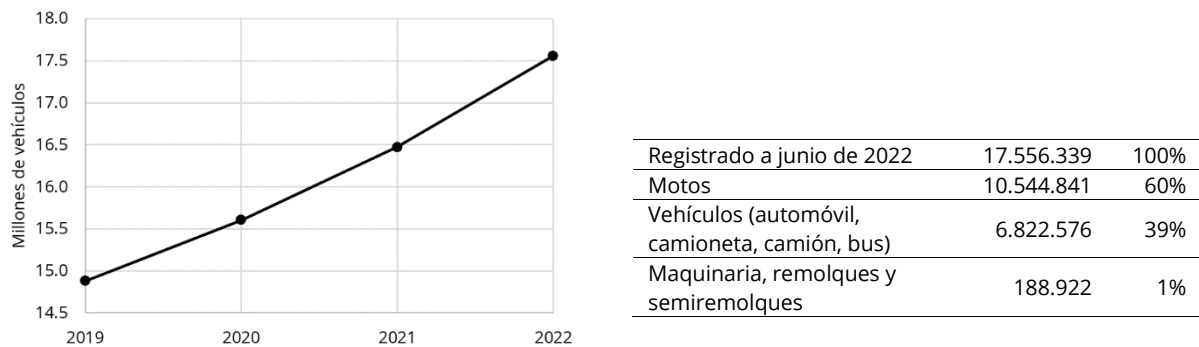


Figura 1. Parque automotor acumulado registrado en el RUNT a nivel nacional [2].

La congestión o atasco es uno de las grandes dificultades de la movilidad urbana, esta se produce cuando el número de vehículos en una vía se acerca o supera la capacidad para la que fue diseñada. Un mal diseño de la infraestructura vial y el uso de controladores de tráfico obsoletos e ineficaces son factores que ahondan los graves complicaciones de tráfico en varias ciudades del mundo[3]. La congestión vehicular ha sido abordada desde principios del siglo pasado, los análisis y las estrategias para mitigar este inconveniente históricamente han requerido una gran cantidad información, datos como el volumen de tráfico que pasa por un punto de una vía, la distribución porcentual del tráfico en cada una de las direcciones y carriles de la vía, el tipo de vehículos que circulan por una vía, la velocidad de los vehículos, entre otros[4]. Estas variables permiten la toma de decisiones, la gestión y el control administrativo sobre la Infraestructura, tecnología y recursos de gestión para mejorar los tiempos de viaje en carretera.

Realizar un conteo vehicular o peatonal de forma manual es una práctica habitual en los estudios viales. Se requiere de personal tomado datos en largos periodos de tiempo que incluyan las horas de mayor circulación de automotores y peatones, para conocer sus diferentes volúmenes de circulación en calles y aceras. A diferencia del tráfico en las vías nacionales, en las cuales fácilmente se puede determinar la cantidad y el tipo de vehículos gracias a la información de los peajes, el tráfico urbano requiere de otras estrategias menos automatizadas para su medición.

Por ejemplo, en un estudio reciente en el que analizaban una vía principal que presentaba problemas de congestionamiento vial, el método de toma de datos consistió en la observación, de las intersecciones de entrada y salida de un tramo de 900 m de longitud. Allí se realizaron conteos manuales y categorización de vehículos durante una semana, así como conteo de tiempos de reparto de los semáforos[5]. Este proceso de aforo vehicular se realizó empleando una plantilla para el registro manual, contabilizándose los vehículos y clasificándolos en cinco tipologías como lo muestra la Figura 2.

CONTEO VEHICULAR						
ESTACIÓN:			PLANILLA N°:			
FECHA:			RESPONSABLE:			
INTERVALO DE TIEMPO (h:min) / (h:min)	MOTO	LIVIANOS	BUSES	METROVIA	PESADOS	TOTAL
00:00 00:00						
TOTAL						
OBSERVACIONES:						

Figura 2. Plantilla para el conteo vehicular [5]

La problemática o la oportunidad de desarrollo que se identificó, en la actividad de recolección de información para estudios viales, es la falta de automatización en los procesos de adquisición de datos, tales como el volumen del tráfico, tipo de vehículo, velocidad y dirección. Las causas que se reconocieron son:

- Los elevados costos de adquisición e instalación de los sistemas de detección vehicular.
- La no portabilidad de los sistemas de detección vehicular. Actualmente existen varias técnicas de detección vehicular que requieren la instalación de elementos mecánicos o eléctricos en las vías, como se muestra en la siguiente figura. Por ejemplo, las mangueras neumáticas que son sensores que detectan el paso del vehículo en base al impulso de presión que se genera, los lazos inductivos detectan el paso del vehículo por variación de la masa magnética sobre el lazo y los sensores piezoeléctricos que detectan el paso del vehículo en base a la carga eléctrica que se genera en el material piezoeléctrico cuando es pisado por una rueda[6]. Estos sistemas requieren obra civil para su instalación y no se pueden trasladar.
- La madurez tecnología. Actualmente las soluciones a los problemas de tráfico vehicular que emplean procesamiento digital de imágenes no están lo suficientemente desarrolladas como para operar de forma totalmente autónoma en la tarea de regulación y monitoreo del tráfico vehicular. Lo anterior se debe principalmente a los problemas de sobre segmentación, sub segmentación y pérdida de información que presentan las técnicas y métodos de segmentación, que son la base del sistema de monitoreo de tráfico vehicular por procesamiento de imágenes [7] (Figura 3).



Figura 3. Sensores inductivos y mangueras instaladas en las vías

Las consecuencias observadas por la falta de automatización en la adquisición de datos para estudio de aforo vehicular son: elevados costos por el pago de personal para la toma y digitalización de los datos, los efectos perjudiciales del cansancio o el aburrimiento de los aforadores, el riesgo del personal aforador apostado en las vías, la demora en la entrega de los datos y la limitación de los puntos de análisis debido a los costos en personal o en instalación de equipos. Estos efectos pueden mitigarse al diseñar e implementar un sistema de conteo vehicular automático y a bajo costo.

Como justificación para la realización de este estudio tenemos que los sistemas de Supervisión Automática Del Tránsito Vehicular SATV prometen, entre otras cosas, facilitar la adquisición de datos de aforo vehicular, mejorar las condiciones de seguridad del tráfico y por ende aliviar las congestiones vehiculares. Además, la mejora continua en la velocidad de procesamiento de la computadora durante la última década ha llevado a varios países a intensificar sus esfuerzos en la investigación y el desarrollo de SATV. También se tiene en cuenta que el control automatizado del tráfico vehicular es un área que ofrece interesantes desafíos en la aplicación de la tecnología de visión artificial.

Así, investigaciones recientes han intentado resolver problemas de tráfico vehicular mediante la aplicación de diversas técnicas que van desde el procesamiento digital clásico de imágenes y vídeo hasta técnicas heurísticas como las redes neuronales artificiales y los algoritmos genéticos. Teóricamente, un SMTV podría tener el mismo poder de observación que un observador humano, facilitará el aforo, pero sin los efectos perjudiciales del cansancio o el aburrimiento [7].

Como parte del estado del arte se puede decir que las técnicas actuales de visión por computadora son capaces de extraer características como la forma, la textura, el tamaño, la ubicación y el color del vehículo. Estas funciones permitirán que un sistema SMTV proporcione información general y específica sobre escenarios de tráfico, como la cantidad de vehículos en la carretera, la dirección del flujo máximo de

vehículos en un momento dado, números de placas y modelos de vehículos. La información anterior, combinada con la ubicación adecuada de la cámara, permite que los SMTV basados en visión rastreen vehículos en escenarios de tráfico simples o complejos, lo que es difícil de lograr con otros tipos de sensores[7].

Los métodos de detección de vehículos mediante visión por computador se basan principalmente en la diferencia entre los fotogramas utilizados para detectar vehículos en escenas estacionarias y vehículos en escenas en movimiento. Aunque estos métodos han demostrado ser adecuados para la detección de vehículos en los sistemas mencionados, también tienen limitaciones, por lo que los sistemas basados en estos métodos son muy sensibles a los cambios o cambios que pueden ocurrir en las condiciones de detección. Previsto, por ejemplo: funciona solo con pequeñas áreas o segmentos de la imagen, guías y colores, marcadores de escena, etc. [7].

Una de las técnicas de visión artificial aplicada al conteo de vehículos que presenta mejores resultados utiliza técnicas de modelado de mezcla gaussiana GMM para sustraer el fondo de la escena y distinguirlo del primer plano o plano superior de la escena. En la práctica, la iluminación de una escena se puede cambiar gradualmente (hora del día, clima, etc.) o de forma improvisada, por ejemplo, cambiando la iluminación de una escena. En ese momento, se pueden introducir o eliminar nuevos objetos de la escena. Para este propósito, además del modelo del plano superior, también se produce un GMM correspondiente al modelado de fondo, y luego los píxeles que cambian en la escena se clasifican con el teorema de Bayes.

2. MÉTODO

Para realizar el conteo vehicular sobre una vía se empleará una cámara posicionada sobre los carriles a analizar, se almacenará el video en un computador y se aplicarán técnicas de visión artificial. Como resultado se identificarán los objetos en movimiento. La Figura 4 esboza el procedimiento.

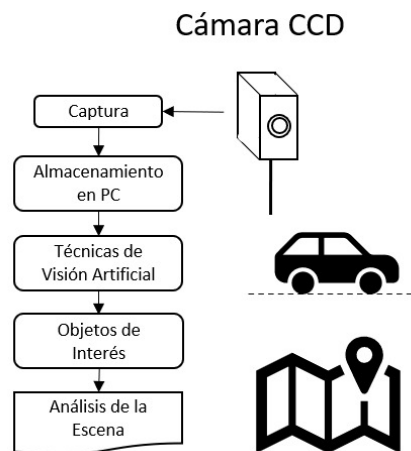


Figura 4. Método general para realizar el conteo vehicular

Determinar el fondo de una secuencia de imágenes (*Frames*), es una tarea habitual para aplicaciones de detección de objetos en movimiento. En este documento se evalúa la clase `cv.BackgroundSustractor`, que esta soportado en la librerías de OpenCV, la tarea específica de la implementación, es realizar el conteo de vehículos en transporte como: motociclistas, automóviles, buses y ciclas. Para el propósito del cumplimiento del proyecto, se realizaron una serie de tomas en video de la vía pública de la ciudad de Yopal.

El algoritmo de sustracción de fondo (`cv.BacgroundSustractor`) fue presentado por Zivkovic en el año 2004 [8]; para extraer el primer plano de una secuencia de imágenes (video), es decir capturar una la escena como si no hubiera objetos en movimiento. El algoritmo se basa en modelar el fondo a través de varias distribuciones gaussianas, esta técnica es muy popular en la teoría de señales y sistemas y se denomina como Gaussian Mixture Models GMM. Dado que el GMM entrega un modelo estadístico del fondo o primer plano, es posible determinar el número de objetos en movimiento, realizando una resta aritmética entre la imagen del fondo y la secuencia de imágenes captados por la cámara (Frames).

También es importante mencionar que la clase `cv.BackgroundSubtractor` permite implementar una mejora del GMM. Dos años después Zoran Zivkovic [9], propone la sustracción de fondo mediante la agrupación de k vecinos más cercanos, este algoritmo puede seleccionar automáticamente el número necesarios de componentes por pixel, de esta manera puede adaptarse completamente a la escena observada, además que reduce el tiempo de procesamiento y se mejora la segmentación.

Para realizar el coteo de vehículos en movimiento en entornos no controlados como, la vía urbana del municipio de Yopal; el flujo algorítmico requiere implementar varias ideas del Procesamiento Digital de Imágenes PDI. En la Figura 5 se muestra el diagrama de flujo implementado, donde podemos observar el algoritmo de sustracción de fondo, segmentación de objetos, operaciones morfológicas, extracción de características y conteo.

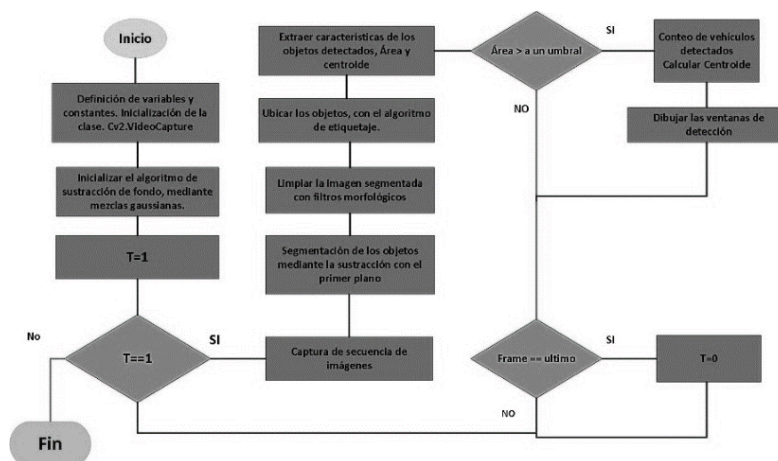


Figura 5. Diagrama de flujo de procesamiento de los datos (Video)

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Algoritmo de Sustracción de Fondo ASF (`cv.BackgroundSubtractor`)

El primer paso del ASF es generar el modelo del primer plano de la secuencia de imágenes. Lo anterior se consigue con la implementación de la clase `cv.createBackgroundSubtractorMGO2`:

```

backSub = cv.createBackgroundSubtractorMGO2(int = history, varThreshold, True)
backSub = cv.createBackgroundSubtractorMGO2(500, 400.0, True)
  
```

Donde la variable `backSub` hereda las propiedades de la clase `cv.createBackgroundSubtractorMGO2` y en ella se encuentra el modelo probabilístico del primer plano. Los parámetros importantes de esta clase son: La cantidad de imágenes a utilizar para la construcción del modelo (`int` 500), el umbral que define si un pixel está bien descrito por el modelo (valor por defecto =16) y, por último, si `varThreshold` se elige como `true`, el algoritmo detectara sobras y las marcara, evidentemente sacrificando velocidad de procesamiento.

`createBackgroundSubtractorMGO2` implementa la sustracción de fondo con el algoritmo de GMM. En el caso que se quiera implementar K -vecinos más cercanos:

```

backSub = cv.createBackgroundSubtractorKNN(500, 400.0, False)
  
```

Que en esencia su primer parámetro es la historia de imágenes para generar el modelo, el umbral de decisión y el detector de sobras.

Como se mencionó anteriormente, el algoritmo de sustracción de fondo calcula la máscara de primer plano mediante una resta aritmética entre el cuadro actual de las secuencias de imágenes y el modelo del fondo. `Cv.BackgroundSubtractor.apply` calcula la máscara en segundo plano.

```

cv.BackgroundSubtractorMGO2.apply(InputArray Imagen, OutputArray fgmask, double learningRate = -1)
  
```

Los parámetros son:

- Imagen. siguiente fotograma de vídeo.
- Fgmask. La máscara de salida en primer plano, es decir la imagen segmentada que divide en dos clases fondo, el fondo en color negro y el objeto en blanco (Figura 6).
- learningRate. El valor entre 0 y 1 que indica que tan rápido se aprende el modelo de fondo.

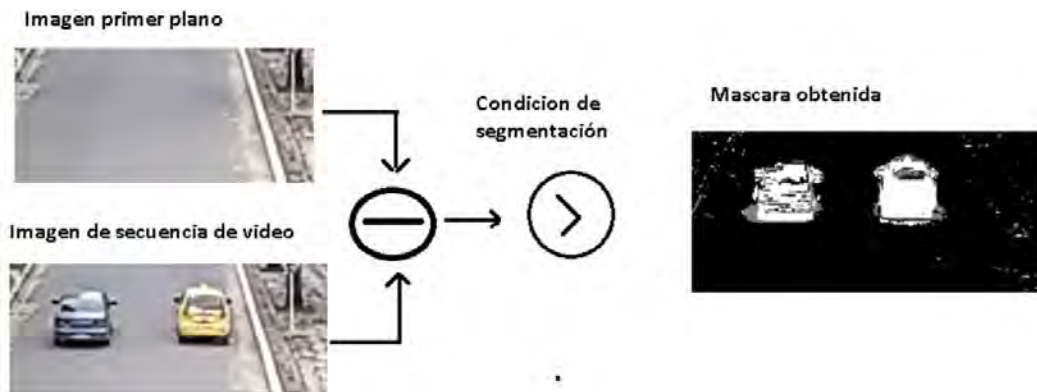


Figura 6. Proceso para obtener la máscara que detecta la ubicación de los móviles

Es importante mencionar que `Cv.BackgroundSubtractor.apply` se debe implementar dentro del bucle `while`, dado que se debe actualizar en con cada nuevo frame de la secuencia de imágenes. El siguiente código describe la línea de procesamiento implementado.

```
import cv2 as cv
capture=cv.VideoCapture('Video4_Trim.mp4')
cv.waitKey(20)
ret,frame=capture.read()
frame=frame[130:720,259:898]
#backSub = cv.createBackgroundSubtractorMOG2(500, 16,False)
backSub = cv.createBackgroundSubtractorKNN(500,400.0,False)
while True:
    ret,frame=capture.read()
    if frame is None:
        break
    frame=frame[130:720,259:898]
    ## Aplicar la mascara
    fgMask = backSub.apply(frame)
    cv.imshow('imagen entrada',frame)
    cv.imshow('frame',fgMask)
    K=cv.waitKey(30)
    if K==27:
        break
capture.release()
cv.destroyAllWindows()
```

3.2 Operaciones morfológicas

En la Figura 7, se puede ver los resultados de implementar el código anterior, en este caso los autos se han logrado extraer con éxito; sin embargo, se presentan algunas otras detecciones que no representan los objetos de interés, lo anterior resulta por el movimiento de las hojas de los árboles y al ruido introducido por el hardware.

Para limpiar los errores que ocurren en todo proceso de segmentación, se recurre a las ampliamente estudiadas operaciones morfológicas; que particularmente en esta implementación se utilizaron la operación de apertura y cierre.

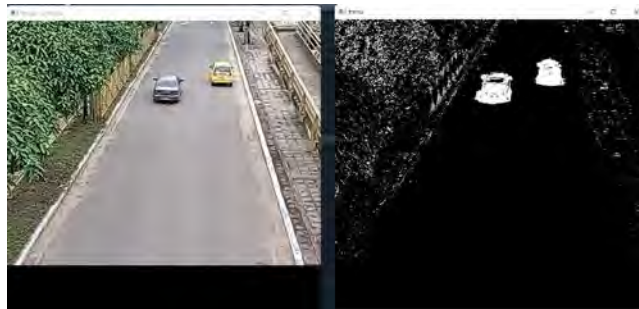


Figura 7. resultados de implementar el código anterior

- Apertura. La apertura es una operación conjunta entre una erosión y una dilatación, esto es útil para eliminar ruido.
- Cierre. El cierre es inverso de la apertura, es decir, es una dilatación seguida de una erosión. Se utiliza comúnmente para tapan pequeños agujeros dentro de los objetos en el primer plano.
- *Limpieza de la imagen*. Las transformaciones morfológicas son operaciones que transforman la estructura de la imagen, y permiten limpiar o mejorar la apariencia de los objetos (Figura 8); estas transformaciones en la mayoría de los casos se aplican a imágenes binarias, y para llevarlas a cabo, se necesita dos entradas a la clase `cv.morphologyEx()`, la primera es la imagen original; la segunda es el elemento estructurante que funciona a modo de filtro. Código implementado en Python:

```

## Elemento estructurante
kernel = cv.getStructuringElement(cv.MORPH_ELLIPSE,(5,5))
kernel1= cv.getStructuringElement(cv.MORPH_ELLIPSE,(3,3))

## Operaciones morfológicas
cleanForeground=cv.morphologyEx(fgMask,cv.MORPH_OPEN,kernel)
mask= cv.morphologyEx(cleanForeground, cv.MORPH_CLOSE, kernel1)
res=cv.bitwise_and(fgMask,fgMask,mask=mask)

```

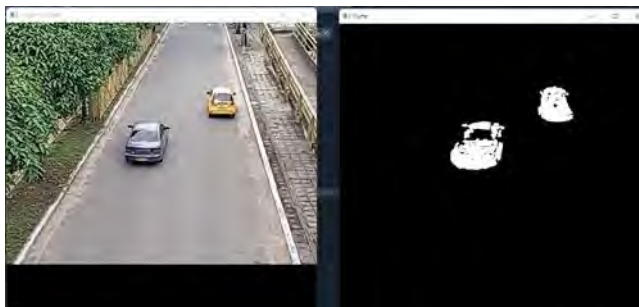


Figura 8 Resultado obtenido al aplicar las operaciones de apertura y cierre

Detección y extracción de características. Desde este punto se ha logrado obtener una imagen con dos clases, una que representa el fondo en color negro y la otra los objetos en blanco. El siguiente paso en el algoritmo es extraer las características de los objetos, pero para hacer esto primero debemos detectarlos, es decir identificar las coordenadas (x,y) en la imagen. OpenCV ofrece un algoritmo contenido en la clase `cv.findContours`, el código recupera contornos de la imagen binaria utilizando el algoritmo [10]. La propuesta de Satoshi Suzuki, se puede usar de manera efectiva para el análisis de formas y la detección y reconocimiento de los objetos. Los parámetros importantes de la clase `cv.findContours` son los siguientes:

```

void cv::findContours (InputArray      imagen,
                      OutputArrayOfArrays contornos,
                      OutputArray      jerarquía,
                      )

```

- InputArray. Es la imagen de entrada de 8 bits de profundidad
- OutputArrayOfArrays. Entrega un vector con los contornos encontrados
- OutputArray. Parámetro opcional de salida, entrega información sobre la topología del contorno

Con las coordenadas (x,y) del objeto, se puede realizar la extracción de características; el cual consiste en la obtención del área, altura, ancho y centroide de los móviles. El área nos permite rechazar objetos pequeños producto de algunas detecciones no importantes, mientras que la altura, el ancho y el centroide del objeto, podemos dibujar el cuadro delimitador en la imagen (bounding box) Figura 9.

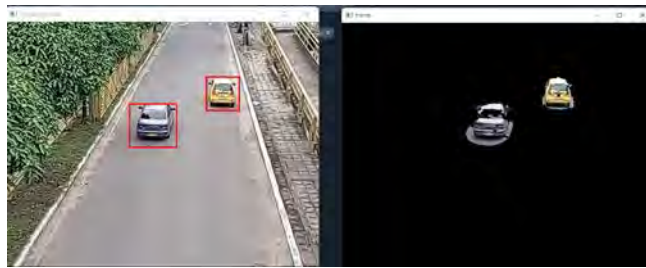


Figura 9. Resultados de aplicar el algoritmo de Suzuki [4], se puede ver como detecta los móviles en movimiento

El código a continuación realiza las tareas de extracción de características y dibuja el cuadro delimitador.

```
#Se ubican los contornos
imagen_gris=cv.cvtColor(res,cv.COLOR_BGR2GRAY)
contours, _=cv.findContours(imagen_gris,cv.RETR_EXTERNAL,cv.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
for c in contours:
if cv.contourArea(c)>=250:
    posicion_x,posicion_y,ancho,alto=cv.boundingRect(c)
    x1=ancho/2
    y1=alto/2
    x1=round(x1)
    y1=round(y1)
    cx=posicion_x+x1
    cy=posicion_y+y1
    cv.rectangle(frame,
    (posicion_x,posicion_y),
    (posicion_x+ancho,posicion_y+alto),
    (0,0,255),2)
```

3.3 Estrategia para el conteo

Para que el algoritmo realice las tareas de conteo de los vehículos que han sido detectados, se dispone de una línea de detección figura 10. Es decir, cuando las coordenadas del centroide (x,y) se encuentra sobre el intervalo de la línea de detección, una variable acumuladora C registra el paso del vehículo. También hay otra variable acumuladora T, pero muestra el número de vehículos presentes en un instante de tiempo:

```
ContT=ContT+1
if 260<=cy & cy<=265:
    ContC=ContC+1
```

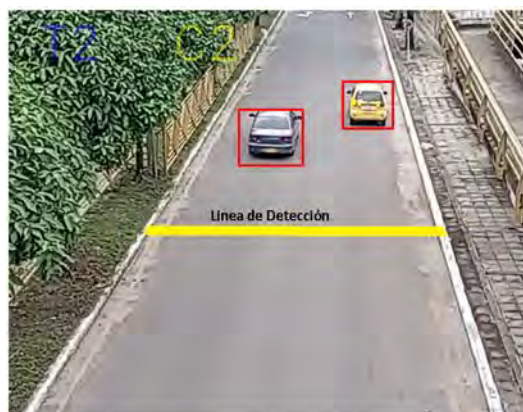


Figura 10. Línea de detección para el conteo de los vehículos

4. CONCLUSIONES

Nosotros presentamos un marco de detección conteo de vehículos bajo los esquemas presentados por Zivkovic [8]. El Modelo de Mezclas Gaussianas GMM mostro un buen comportamiento para adaptarse a la escena y extraer el primer plano de una secuencia de imágenes.

Por otro lado, el modelo logra el procesamiento en tiempo real, dado que el sistema analiza hasta 30 fps/sg. Sin embargo, la implementación genera pequeñas detecciones no pertenecientes a objetos, que es atribuido a ruido del hardware y problemas medio ambientas.

Las pequeñas detecciones pueden ser ignoradas utilizando las operaciones morfológicas y el algoritmo de Suzuki [10]. Otro problema importante que presenta el algoritmo, es las falsas detecciones de objetos altamente ocluidos; para ambientes con un alto flujo vehicular, los objetos se superponen y las observaciones muestran que el algoritmo no es capaz de separarlos, para este caso, no se consigue una solución óptima bajo GMM.

Para futuro proyectos a aconsejamos utilizar el modelo GMM junto con clasificadores del Machine Learning (ML), de esta manera, el algoritmo GMM genera regiones mientras que el clasificador ML se encarga de buscar los objetos ocluidos.

REFERENCIAS

- [1] Traffic Index. (2022). Recuperado: <https://www.trafficindex.org/?order=avg>
- [2] Ministerio de Transporte. (2020). Runt en cifras. Recuperado: <https://www.runt.com.co/runt-en-cifras>
- [3] Hernández G. et al. (2015). Problemática en Intersecciones viales de áreas urbanas: Causas y soluciones. CULCyT 20.
- [4] Correa M. (2021). Manual de diseño de vías urbanas. Disertación doctoral. Universidad EAFIT.
- [5] Verdezoto T. et al. (2020). Análisis del congestionamiento vehicular para el mejoramiento de vía principal en Guayaquil-Ecuador. Gac. Téc. 21(2), 4-23.
- [6] Soria E. y López J. (2016). Sistema para la generación de estadística del aforo vehicular mediante sensores magneto-resistivos inalámbricos. Recuperado: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/18556>
- [7] Hasan M. (2010). A framework for intelligent decision support system for traffic congestion management system. Engineering 2(4), 270-289.
- [8] [8] Z. Zivkovic, «Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction», en Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004., 2004, vol. 2, pp. 28-31.
- [9] Zivkovic Z. y Van Der Heijden F. (2006). Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background subtraction. Pattern Recognit. Lett. 27(7), 773-780.
- [10] Suzuki S. (1985). Topological structural analysis of digitized binary images by border following. Comput. Vis. Graph. Image Process. 30(1), 32-46.

Trastorno musculoesquelético derivado del uso de dispositivos móviles o síndrome de cuello de texto: Una revisión de la literatura

Ricardo De la Hoz Lara¹
Laura Imitola González²
Jhon Arráez Restan³
Jessica Cortez López⁴
Jhonatan Domínguez Perdomo⁵
Héctor Saltarín Castillo⁶
Universidad Libre
Colombia

En este capítulo se muestra la revisión de la literatura sobre el síndrome de cuello de texto, trastorno musculoesquelético derivado del uso de dispositivos móviles. La revisión realizada partió de la definición de variables a analizar, previo establecimiento de los criterios de inclusión, centradas fundamentalmente en las investigaciones experimentales. Como resultados se destaca la prevalencia de la aplicación de cuestionarios auto diligenciados sobre percepción de molestias musculares, estudios centrados en la medición de ángulos de flexión de cuello, cabeza y brazos, y la aplicación de técnicas de respuesta muscular como las electromiografías EMG, entre otros. Se resalta la necesidad de entrenamiento de los usuarios de los dispositivos móviles para un uso más ergonómico y con menores efectos nocivos.

¹ Ingeniero Industrial y Magíster en Ingeniería Industrial.

Contacto: ricardo.delahozl@unilibre.edu.co

² Ingeniero Industrial.

Contacto: laurap-imitolag@unilibre.edu.co

³ Ingeniero Industrial.

Contacto: jhons-arraezr@unilibre.edu.co

⁴ Ingeniero Industrial.

Contacto: Jessical-cortezl@unilibre.edu.co

⁵ Ingeniero Industrial.

Contacto: jhonatand-dominguezp@unilibre.edu.co

⁶ Ingeniero Industrial.

Contacto: hectorg-saltarinc@unilibre.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El término texto cuello *textneck* se ha popularizado en la última década por su relación con los dispositivos móviles. Este se puede definir como una lesión por estrés repetido y un dolor provocado por ver o enviar mensajes de texto en exceso en dispositivos de mano durante un período prolongado [1]. El uso continuo y permanente de dispositivos como smartphones, tabletas, phablets, entre otros, por personas de todas las edades ha conducido a su uso prolongado durante el día, lo que ha derivado en problemas musculoesqueléticos [2]. Reid y Portelli [3] definieron este término como una afección que se presenta como un dolor de cuello de aparición insidiosa que se cree que está asociado a largos periodos de flexión de la columna cervical mientras se realizan pruebas o se utilizan dispositivos electrónicos sin apoyo. Los síntomas musculoesqueléticos del cuello, los hombros y la parte superior de la espalda en los usuarios de teléfonos inteligentes han ganado una atención cada vez mayor.

A medida que los teléfonos móviles adquieren más influencia en la vida diaria, también aumenta la aparición de efectos nocivos en los usuarios. Esto se deriva de la necesidad del uso, teniendo en cuenta las capacidades y tendencias de estos dispositivos para la ejecución de tareas de todo tipo, basados en su conectividad [4].

Sin embargo, en torno a las lesiones derivadas de su uso, Povolotsky y otros [5] encontraron que el número de lesiones en la cabeza y el cuello relacionadas con el uso de teléfonos celulares aumentó de manera constante durante los últimos 20 años entre usuarios de teléfonos móviles en Estados Unidos.

Cuando se envían mensajes de texto en un teléfono móvil se da poca carga física, movimientos repetitivos del pulgar y flexión del cuello [6]. Los adultos jóvenes son un grupo con un uso intenso de teléfonos móviles, quienes textean la mayor parte del tiempo. Tal vez por ello, los adultos jóvenes han mostrado depresión y otros síntomas, lo cual se asocia al uso de estos dispositivos [7].

Se han desarrollado distintos estudios e investigaciones cuyo objetivo ha sido mostrar el efecto causado en el cuello y cabeza derivado del uso de dispositivos móviles. Sin embargo, se requieren de otros estudios que den a conocer el estado de la literatura sobre el Síndrome de Cuello de texto. Es por ello que, de acuerdo con lo descrito, surgió la necesidad de este artículo cuyo objetivo es la realización de una revisión sistemática de la literatura, teniendo como guía los artículos que abordan la temática de cuello de texto encontrados en las diferentes bases de datos bibliográficas, por medio de la aplicación de la metodología PRISMA [8].

2. MÉTODO

En la presente revisión de la literatura se analizaron artículos que abordan el tema de cuello de texto y su impacto en la salud, aplicando el enfoque metodológico de revisiones de literatura según el método PRISMA [8] para revisiones de literatura y metaanálisis. Respecto al criterio de inclusión, se consideraron aquellos trabajos que estudiaran el Síndrome del Cuello de Texto y la incidencia en distintos grupos de personas (estudiantes universitarios, personal general; diferentes grupos de edades), y el uso de distintos métodos como la electromiografía, estudios clínicos y de laboratorios, encuestas y otros.

Así mismo, se consideraron artículos que no tratarán directamente el tema de cuello de texto, pero que sí mencionaran patologías derivadas del uso de dispositivos móviles que generan síntomas asociados al cuello de texto. De otra parte, no se consideraron otros estudios que abarcaran una revisión de la literatura en sí mismos o manejaran un enfoque distinto al de investigación.

La búsqueda de información se realizó desde el día 9 de junio del año 2021 hasta el 31 de marzo de 2022, y se enfocó en la revisión de artículos encontrados en los índices bibliográficos y bases de datos *Scopus*, *ScienceDirect*, *ClinicalKey*, *UptoDate*, *BVS* y *Pubmed*. Como estrategia de búsqueda se emplearon las siguientes combinaciones de términos, aplicando los operadores lógicos *AND* y *OR*: (*textneck*), (*text collar effects*), (*why text neck occurs*), (*injuries resulting from text neck*), (*cuello de texto*), (*neck pain during cell phone using*). Cabe resaltar que se incluyeron investigaciones de cuello de texto en idioma inglés y español.

Partiendo de una iteración inicial en la búsqueda, se procedió a filtrar las redundancias en los artículos encontrados en las distintas bases de datos e índices, y a seleccionar cuáles se ajustaba de manera precisa a la investigación, tabulando los resultados en una hoja de cálculo en la herramienta Microsoft Excel. Así mismo, se revisó cuáles artículos eran accesibles a cuerpo completo, que cumplieran con los criterios de inclusión y exclusión. La Figura 1 muestra el protocolo aplicado.

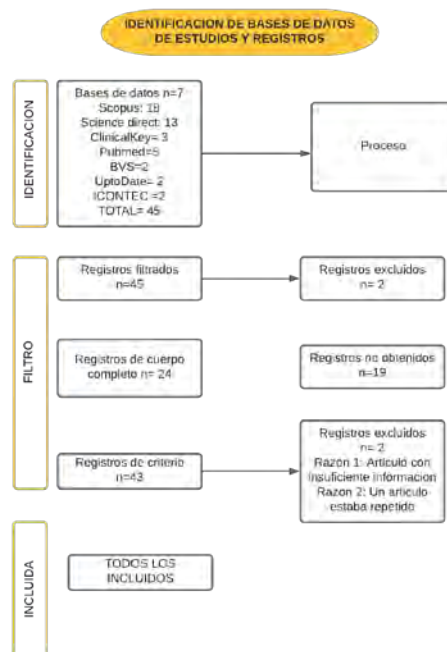


Figura 1. Proceso de selección de fuentes para la revisión de la literatura

Dentro de los métodos de selección se trabajó de manera independiente teniendo en cuenta el criterio de cuello de texto y sus efectos, aplicados a una muestra de distintas personas. Se construyó una matriz en una hoja de cálculo de Microsoft Excel para organizar los artículos incluidos. Con respecto a las variables consideradas en cada uno de los artículos, la definición y ejemplo de valores encontrados fueron:

- Metodología: es el estilo o forma en cómo se aborda la investigación, los valores son: cuestionarios, encuestas, simulaciones, estudio de laboratorios, mediciones y estudio transversal.
- Tipo de usuario: establece a qué grupo pertenece el sujeto al cual se le fue aplicada la investigación. Los valores son: rango de edades y estudiantes; jóvenes y adultos, y usuarios en general.
- Tipo de dispositivo: especifica qué dispositivo móvil se tomó en cuenta para la investigación. Los valores fueron: smartphone, tableta y otros.
- Escenario de evaluación: muestra desde qué aspecto o lugar se llevó el estudio. Los valores fueron: simulación y estudio de campo (estudio clínico).
- Tipo de población aplicada: esta variable hace referencia a la persona que se tuvo en cuenta para la realización de dicho muestreo aplicado, en este caso fueron estudiantes universitarios, personal de las empresas y otros. cabe aclarar que no se especificó el tipo de población y se tomó estos como otros
- Rango de edad predominante de los participantes: se identifica la edad de las personas que realizaron la diferente metodología asignada, entre ellos están jóvenes, adultos y adultos mayores.
- Región de estudio: muestra el país, región o lugar la cual la investigación fue aplicada
- Técnicas estadísticas empleadas: es la aplicabilidad de herramientas estadísticas en la fase de toma de datos y resultados en el artículo
- Impactos causados: hace referencia a los diferentes daños causados debido al cuello de texto que se manejan en la investigación y los valores fueron: cabeza y cuello, dolor de cuello, parte ocular, cabeza y problemas musculoesqueléticos, problema en el cuello, trastornos musculoesqueléticos, síndrome de cuello, entre otros.

El proceso de recolección de datos fue llevado a cabo por seis investigadores, quienes trabajaron de manera coordinada, y los resultados se analizaron conforme distintos temas relacionados con el cuello de texto (cuello, dolor, músculo, ángulo, teléfonos, *smartphones*, *tabletas*, posición, afectaciones. entre otros). Todas estas variables se definieron como pieza clave para el análisis de la literatura.

Como parte de los resultados, teniendo en cuenta la búsqueda realizada, se tabuló el análisis de los diferentes artículos considerados para la revisión. La tabla muestra el nombre de artículo, autores, año, tema de investigación, y metodología aplicada, país de origen, tipo de trabajo, base de datos, resumen, variables y características. Así mismo, con estos resultados se pudo realizar un metaanálisis de las variables, mostrando el comportamiento por variables según el estudio realizado.

3. RESULTADOS

3.1 Revisión de la literatura

Después de aplicar el protocolo de búsqueda y seleccionar las fuentes bibliográficas para la revisión de la literatura sobre cuello de texto, se analizaron los artículos que cumplieron con los criterios de inclusión. Tal y como se describe en la metodología, la revisión de la literatura se hizo de manera tabular. La Tabla 1 muestra la síntesis de las fuentes revisadas.

Tabla 1. Trabajos seleccionados para el análisis

Fuente	Metodología
[9]	Se utilizó el Cuestionario Nórdico y se aplicó la encuesta global de consumidores de móviles. Se midieron los ángulos de flexión de cuello, brazo y muñeca, y se midieron los reflejos antes y después de la exposición continua al uso del smartphone. Se correlacionó el peso del dispositivo, ángulos de flexión, respuesta de los reflejos y malestar generado.
[10]	La muestra estuvo compuesta por 582 voluntarios con edades comprendidas entre 18 y 65 años. Las preguntas sociodemográficas, antropométricas, de estilo de vida, psicosociales, NP y relacionadas con el uso de teléfonos inteligentes se evaluaron mediante un cuestionario auto informado. El cuello del texto se evaluó midiendo el ángulo de flexión cervical de los participantes de pie y sentados mientras escribían un texto en sus teléfonos inteligentes, utilizando el dispositivo de rango de movimiento cervical
[11]	Se realizó un estudio correlacional transversal en una muestra de estudiantes seleccionados mediante muestreo de conveniencia en estudiantes universitarios de Medicina y Cirugía, uso rutinario / diario de dispositivos móviles con computación avanzada y conectividad, capacidad en un sistema operativo y con edades comprendidas entre los 18 y los 30 años. Los participantes completaron cuestionarios que midieron las características generales del uso de teléfonos inteligentes y las características demográficas. El dolor de cuello se evaluó mediante una puntuación de dolor analógica visual EVA y un dibujo de dolor PD; el estado de discapacidad se midió utilizando el Índice de discapacidad del cuello NDI-I; y las posturas cervicales durante el uso del teléfono se capturaron con el dispositivo de rango de movimiento cervical Deluxe CROM.
[12]	Este estudio se llevó a cabo conjuntamente en los departamentos de medicina y oftalmología de la Facultad de Medicina y Odontología de la Media Luna Roja de Pakistán entre el mes de enero 2020 a diciembre de 2020. Se inscribieron estudiantes que estuvieran dispuestos a participar en el estudio. A estos se les entregaron formularios para su auto diligenciamiento. Cada participante se sometió a un examen médico y psicológico ocular completo.
[13]	Se usó una muestra de 113 estudiantes de secundaria entre 18 y 21 años en un estudio transversal. Como postura auto percibida, los participantes tuvieron que elegir en un cuestionario una de las cuatro posturas del cuello de una persona que envía mensajes de texto en un teléfono móvil. Los fisioterapeutas clasificaron las fotografías laterales tomadas a los participantes enviando mensajes de texto en un teléfono móvil en su postura habitual como 1 (normal), 2 (aceptable), 3 (inapropiado) y 4 (excesivamente inapropiado).
[14]	Se seleccionaron 253 estudiantes de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión. Fueron evaluados midiendo la postura de la cabeza en reposo, utilizando el método de una regla y se distribuyó un cuestionario autoadministrado a todos los sujetos. Los datos obtenidos fueron tabulados y analizados estadísticamente.
[15]	Participaron 28 usuarios jóvenes y sanos de teléfonos inteligentes que caminaron a lo largo de una pista recta de 60 metros mientras realizaban tareas de navegación web con una mano y mensajes de texto con las dos manos, utilizando sus dispositivos. La inclinación de la cabeza se cuantificó utilizando un sensor de unidad de medida inercial, colocado en la frente. Los participantes mantuvieron una postura de inclinación hacia adelante a 31,1 ° (ángulo medio) de la vertical cuando navegaban por la web y 38,5 ° (ángulo medio) al leer y enviar mensajes de texto, con una inclinación significativamente mayor ($p < 0,05$) de la tarea de enviar mensajes de texto.
[2]	Se analizó la conciencia del síndrome del cuello del texto entre los adultos jóvenes de la India, mediante un cuestionario estándar. La metodología aplicó un análisis descriptivo de los resultados.
[16]	Se aplicó un estudio transversal empleando una técnica de muestreo conveniente no probabilística en el Akhtar Saeed Medical and Dental College en un período de dos meses. Se usó una muestra de 101 estudiantes de pregrado (del 1er año en adelante), usuarios de teléfonos, tabletas y computadoras durante los últimos 6 meses y más. Los datos se obtuvieron mediante un cuestionario validado y autoadministrado y un formulario de índice de discapacidad del cuello.

[17]	Se selecciono una muestra de 17 adultos jóvenes sanos quienes interactuaron en un dispositivo de mano mientras estaban de pie y sentados. Se registró la cinemática de la parte superior del cuerpo y la electromiografía EMG de la superficie del trapecio superior para capturar los parámetros de la cinemática de las articulaciones y actividad muscular, para luego compararlos con los indicadores de malestar auto informados a través de cuestionario de escala CR 10 de Borg.
[18]	Se evaluó la actividad del músculo trapecio y la fatiga mediante un método objetivo (electromiografía de superficie, sEMG) y el malestar mediante un método subjetivo (cuestionario) en usuarios de teléfonos inteligentes durante la realización de diferentes tareas de introducción de texto. Se reclutó a 15 participantes para realizar 6 tareas de introducción de texto en diferentes condiciones del antebrazo (flotando y apoyado) y posturas corporales (sentado, de pie, acostado y caminando).
[19]	La investigación se realizó con una población de adultos jóvenes suecos con una edad entre los 20 y 24 años, se recopilaban datos a través de un cuestionario basado en la web al inicio del estudio (n = 7092) y después de uno y cinco años.
[20]	Se usó una muestra de personas con síntomas de cuello de texto y otros sanos, 19 y 18 participantes, respectivamente. Se le asignaron tareas en un dispositivo móvil y en computadora. Se analizó la cinemática en los tres ejes de la región de la cervix, tórax y lumbar.
[21]	Una muestra de 25 adolescentes sanos usó la mano dominante para realizar una tarea de mensajes de texto de 30 minutos usando un teléfono inteligente con pantalla táctil en dos momentos separados bajo una de las siguientes dos condiciones: colocar cinta en el músculo trapecio superior y sin cinta.
[22]	Se empleó un estudio transversal con jóvenes de 22 años nacidos en 1993, analizando las zonas de molestias (cuello, espalda media y espalda baja), considerando la exposición a dispositivos móviles y a computadores. Se usó la regresión de Poisson para analizar los índices de prevalencia.
[23]	Una muestra de 16 usuarios de teléfonos inteligentes con dolor de cuello y 9 usuarios asintomáticos fueron asignados con tareas de chatear por mensaje de texto, con posturas sentada y de pie en un entorno de laboratorio, probando un dispositivo ocular para afectar las posturas de la cabeza y cuello.
[24]	Este estudio examinó las diferencias en la actividad muscular del cuello en varios ángulos de flexión en usuarios de teléfonos inteligentes con y sin dolor de cuello. Los 44 participantes realizaron tareas de mensajes de texto durante 1.5 minutos. La actividad muscular del cuello y el dolor asociado fueron medidos en diversos ángulos de flexión.
[25]	Se realizó un estudio de laboratorio con 20 participantes para determinar si algunas medidas ergonómicas (uso de apoyabrazos y soporte para la espalda) afectaban los ángulos de flexión de los participantes durante el uso del teléfono móvil.
[26]	En un estudio transversal, se aplicó un cuestionario que incluía información demográfica, escala de adicción a dispositivos móviles y el cuestionario nórdico modificado a 249 participantes. Se analizaron los resultados según lo reportado.
[27]	Se registró la actividad muscular del trapecio superior derecho e izquierdo y se administró CR10 BorgScale después de cada sección experimental. Se empleó electromiografía en el estudio.
[28]	Una muestra de 49 pacientes con síntomas de dolor por uso de un teléfono celular se dividió al azar en dos grupos. Se evaluó la existencia de banda tensada y la severidad del dolor TP en los músculos trapecio, esternocleidomastoideo y LS.
[29]	Se tomó una muestra de 150 adultos jóvenes de 18 a 21 años de una escuela secundaria pública en el estado de Rio de Janeiro en un estudio transversal. Se aplicó un cuestionario auto diligenciable sobre aspectos sociodemográficos factores, factores antropométricos, tiempo dedicado a enviar mensajes de texto o jugar con un teléfono móvil, impedimentos visuales y preocupación por la postura corporal. La postura del cuello fue por autopercepción y según el criterio de un fisioterapeuta durante la ejecución de una tarea. Se utilizó el Cuestionario de Young Spine para evaluar el dolor de cuello.

3.2 Metaanálisis de la literatura

Con base en la literatura revisada, fue posible realizar un metaanálisis, teniendo en cuenta las variables metodología, clasificación de los participantes, región de estudio, técnica estadística empleada e impactos causados. Las Figuras 2 a 7 muestran cómo se distribuyen los resultados.

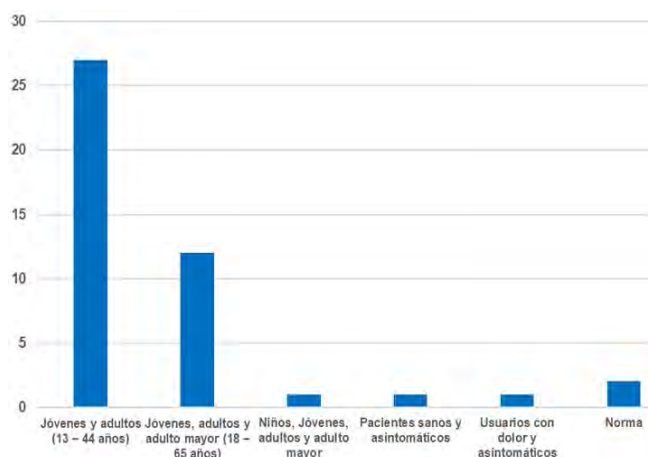


Figura 2. Clasificación de los participantes por estudio

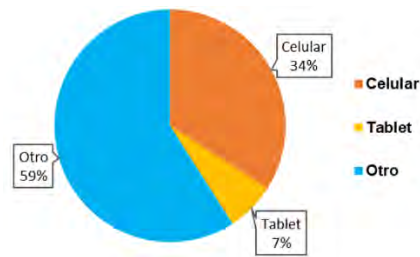


Figura 3. Tipos de dispositivos asociados al estudio



Figura 4. Escenario de evaluación en la investigación



Figura 5. Tipo de población participante en el estudio

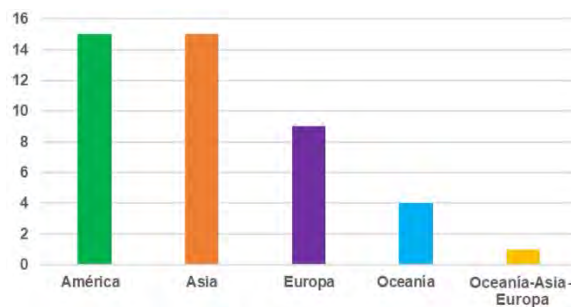


Figura 6. Distribución de los estudios analizados por región



Figura 7. Clasificación de los impactos asociados al cuello de texto

De acuerdo con la revisión de los gráficos circulares realizadas a continuación se puede evidenciar que en relación con los dispositivos usados por la población hay un mayor uso en dispositivos celulares con un 34% que en tableta con un 7% y un 59% en otros diferentes dispositivos. En el escenario de evaluación representa el lugar donde se llevó a cabo la investigación en donde se refleja un mayor escenario de evaluación en lugares clínicos con un 54% y en simulación con un 39%. Por otro lado, en la población aplicada se refleja el tipo de persona o grupo escogido para la investigación la cuales se clasifican en estudiantes universitarios, oficina-empresas y población general la cual tuvo un porcentaje de 77% siendo el tipo de población más común.

3.3 Hallazgos destacados de la revisión de la literatura

Casi todos los estudios encontraron evidencia en relación con el cuello de texto y la aparición de síntomas musculoesqueléticos. No obstante, estudios como el de Correia y otros [10]; Betozzi y otros [11], indican que no existe una clara relación entre el uso de dispositivos y la generación de una evidente lesión la región de cuello, espalda y extremidades. Para Gustafsson y otros [19], si bien aparecen síntomas, estos son de corta duración.

Varios de los estudios incluyeron como parte de su metodología la aplicación de cuestionarios, algunos con enfoques específicos, como es el caso del Cuestionario Nórdico [9, 26], el cual fue encontrado en varios estudios, o la Escala de Borg [17, 27]. Así mismo, muchos de ellos fueron autoaplicados [2, 10-14, 18, 29].

En general, se encuentra que los usuarios tienden a asumir ángulos de flexión de cabeza, cuello y espalda que pueden generar cansancio, fatiga o lesiones, debido a un uso inadecuado o por posturas repetitivas al realizar tareas con el dispositivo móvil, especialmente las relacionadas con la digitación de texto [9, 13-16, 22].

4. DISCUSIÓN

La mayoría de los estudios analizados se centran en los efectos asociados a la salud en términos de padecimientos músculo-esqueléticos derivados del uso de dispositivos denominados smartphones, frente a otros tipos de dispositivos. En varios de los ellos se asocia el uso y ángulo postural de uso, así como en el tiempo de uso, con los efectos nocivos de estos dispositivos. No obstante, se destaca que la mayoría se condujeron bajo la forma de estudios clínicos, donde participó la población general. Sin embargo, se destaca un porcentaje de artículos cuya población fue la universitaria (21%).

También es de resaltar que son América, Asia y Europa los lugares donde predominaron la mayoría de estudios encontrados, con una destacada preponderancia de los padecimientos en el cuello, cabeza y brazos derivados del uso de los smartphones. Las simulaciones de datos, como mecanismo de análisis e inferencia, van tomando mayor relevancia en la literatura científica ya que se observó que cerca del 39% de las fuentes consultadas hacían uso de ella, bien sea como simulación dedicada o como parte del proceso de análisis de datos.

Finalmente, al evidenciarse desconocimiento de los usuarios en términos de un uso ergonómico de los dispositivos móviles y los efectos nocivos que pueden traer en el mediano y largo plazo, es pertinente sugerir que existe espacio para que futuras investigaciones se centren en mecanismos de prevención o mitigación de los efectos relacionados con el cuello de texto en la población en general.

5. CONCLUSIONES

El cuello de texto es uno de los padecimientos musculoesqueléticos que ha tomado protagonismo en la última década debido al incremento del uso de dispositivos móviles ampliamente generalizado. En la literatura fue posible encontrar estudios que muestran cómo se han incrementado las lesiones y molestias en torno al cuello, los hombros y los brazos por los malos hábitos y uso indebido de celulares, tabletas y, en general, smart devices.

Conviene establecer protocolos y políticas públicas de salud que promuevan un uso saludable de los dispositivos en todos los niveles de la población, considerando que la revisión de la literatura mostró una tendencia al aumento de casos de cuello de texto en la población en general. Por ello, los entes de salud deberían comprometerse en fomentar el uso adecuado como mecanismos de prevención y mitigación de los riesgos de lesión crónica.

Como líneas de investigación futuras se destaca el uso de las simulaciones como herramientas de estimación de los casos, tal y como se reflejó en la revisión de la literatura. Así mismo, la identificación de mecanismos de prevención y la creación de dispositivos para la mitigación de las lesiones, tipo equipos de protección personal, muestran ser una línea promisoría en el estudio y abordaje del cuello de texto como problema de salud pública.

REFERENCIAS

- [1] Optima Health Physio Consult. (2018). Text Neck Syndrome. Recuperado: <https://www.optimaphysio.com/blog/text-neck-syndrome>
- [2] Akshaya R. y Mohanraj K. G. (2019). Knowledge, perception, and awareness of text neck syndrome among young adults South Indian population. *Drug Invention Today* 12(9), 1980-1982.
- [3] Reid S. y Portelli A. (2015). The effects of 'text neck' on head repositioning accuracy: A two group comparative study. *Physiotherapy* 101, e1270.
- [4] Islam N. y Want R. (2014). Smartphones: Past, present, and future. *IEEE Pervasive Computing* 13(4), 89-92.
- [5] Povolotskiy R. et al. (2020). Head and neck injuries associated with cell phone use. *Otolaryngology-Head & Neck Surgery* 146(2), 122-127.
- [6] Gustafsson E. et al. (2010). Thumb postures and physical loads during mobile phone use - A comparison of young adults with and without musculoskeletal symptoms. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 20(1), 127-135.
- [7] Thomée S. et al. (2011). Mobile phone use and stress, sleep disturbances, and symptoms of depression among young adults--a prospective cohort study. *BMC Public Health* 11(66), 1-11.
- [8] PRISMA. (2021). Prisma statement: Transparent reporting of systematic reviews and meta-analyses. Recuperado: <https://prisma-statement.org/>
- [9] Genes S. y De la Hoz R. (2019). Text neck, more technology, less health? En *Advances in Intelligent Systems and*
- [10] Correia I. et al. (2021). Association between text neck and neck pain in adults. *Spine* 46(9), 571-578.
- [11] Bertozzi L. et al. (2021). Posture and time spent using a smartphone are not correlated with neck pain and disability in young adults: A cross-sectional study. *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 26, 220-226.
- [12] Hussain A. et al. (2021). Ocular, medical and psychological effects in medical students who use smart phones. *Pakistan Journal of Medical and Health Sciences* 15(2), 443-445.
- [13] Damasceno G. M. et al. (2018). Reliability of two pragmatic tools for assessing text neck. *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 22(4), 1-5.
- [14] Kamalakannan M. et al. (2020). Estimation and prevention of text neck syndrome among smart phone users. *Biomedicine* 40(3), 372-376.
- [15] Han H. y Shin G. (2019). Head flexion angle when web-browsing and texting using a smartphone while walking. *Applied Ergonomics* 81, 102884.
- [16] Khan A. et al. (2018). Are you suffering pain neck due to smart phone text neck syndrome. *Pakistan Journal of Medical and Health Sciences* 12(3), 1095-1097.
- [17] D'Anna C. et al. (2021). Linking head and neck posture with muscular activity and perceived discomfort during prolonged smartphone texting. *International Journal of Industrial Ergonomics* 83, 103134.
- [18] Tang Z. et al. (2021). Ergonomic evaluation of the effects of forearm conditions and body postures on trapezius muscle activity during smartphone texting. *International Journal of Industrial Ergonomics* 82, 103085.
- [19] Gustafsson E. et al. (2017). Texting on mobile phones and musculoskeletal disorders in young adults: A five-year cohort study. *Applied Ergonomics* 58, 208-214.
- [20] Xie Y. et al. (2017). Spinal kinematics during smartphone texting - A comparison between young adults with and without chronic neck-shoulder pain, *Applied Ergonomics* 68, 160-168.
- [21] Areeudomwong P. et al. (2018). Effects of shoulder taping on discomfort and electromyographic responses of the neck while texting on a touchscreen smartphone. *Saf Health Work* 9(3), 319-325.
- [22] Blumenberg C. et al. (2021). Association of the length of time using computers and mobile devices with low back, neck and mid-back pains: findings from a birth cohort. *Public Health* 195, 1-6.
- [23] Tang C. et al. (2021). An investigation of an ergonomics intervention to affect neck biomechanics and pain associated with smartphone use. *Work* 69(1), 127-139.
- [24] Namwongsa S. et al. (2019). Effect of neck flexion angles on neck muscle activity among smartphone users with and without neck pain, *Ergonomics* 62(12), 1524-1533.

- [25] Syamala K. et al. (2018). Armrests and back support reduced biomechanical loading in the neck and upper extremities during mobile phone use. *Applied Ergonomics* 73, 48-54.
- [26] Mustafaoglu R. et al. (2021). The relationship between smartphone addiction and musculoskeletal pain prevalence among young population: a cross-sectional study. *The Korean Journal of Pain* 34(1), 72-81.
- [27] D'Anna C. et al. (2021). Myoelectric signs of sustained muscular activity during smartphone texting BT. En 8th European Medical and Biological Engineering Conference.
- [28] Soyer O. y Akarirmak Z. Ü. (2020). The effect of postural correction and exercise on neck pains in cell phone users. *Turk Osteoporoz Dergisi* 26(2), 81-91.
- [29] Damasceno G. et al. (2018). Text neck and neck pain in 18-21-year-old young adults. *European Spine Journal* 27(6), 1249-1254).

Desarrollo de un prototipo de realidad mixta como apoyo al proceso de aprendizaje de estudiantes con y sin discapacidad auditiva

Yersson Sánchez Lozano¹
Emmanuel Santiago Buitrago Barreto²
Martha Yaneth Segura Ruiz³
Universitaria Agustiniana
Colombia

Teniendo en cuenta las necesidades académicas de los estudiantes en condición de pérdida de capacidad auditiva, y de conformidad con los avances en computación con el desarrollo de las máquinas actuales enfocadas en la inmersión y los nuevos retos en desarrollo de software, se plantea la pregunta: ¿cómo obtener los mejores resultados en el desarrollo de software inclusivo para las tecnologías emergentes como la realidad mixta? A consecuencia de esto y a partir del análisis de investigación se desarrolla un prototipo de realidad mixta como herramienta para compartir conocimiento con estudiantes y profesores. Los principales resultados demuestran que se pueden desarrollar sistemas capaces de apoyar el proceso de aprendizaje para estudiantes oyentes y sordos. En el desarrollo del prototipo se incluyen herramientas enfocadas al entretenimiento, los motores de videojuegos y la interactividad asertiva. Los resultados demuestran que se puede comunicar conceptos de manera correcta integrando componentes, armonizando la estética de un videojuego y sus elementos gráficos e interactivos para compartir conocimiento. Se concluye que la comunicación asertiva con estudiantes oyentes y sordos es posible, e importante para generar espacios de inclusión dentro de las instituciones educativas. Sin embargo, es complicado debido a las distintas formas de comunicación y canales usados, y sus representaciones gráficas dentro de la esquematización visual.

¹ Tecnólogo en Desarrollo de Software.
Contacto: yersson.sanchezl@uniagustiniana.edu.co

² Tecnólogo en Desarrollo de Software
Contacto: emmanuel.buitragob@uniagustiniana.edu.co

³ Ingeniera de Sistemas, Especialista en Diseño y Construcción de Soluciones Telemáticas, Especialista en Ingeniería del Software y Magíster en Administración y Dirección de Empresas.
Contacto: emmanuel.buitragob@uniagustiniana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los estudiantes tienen la necesidad de compartir y recibir un pensamiento estructurado con elementos complejos. La pandemia generada por el Covid-19 entre 2019 y 2021 enseñó a la comunidad educativa la necesidad de conocer y usar nuevas tecnologías para el progreso del aprendizaje. La realidad virtual y aumentada o mixta ofrece un nuevo paradigma en el ámbito de los medios de comunicación, puesto que debe tener en cuenta la inmersión del receptor.

Esto es vital para la supervivencia de los desarrolladores que buscan entrar a un mercado competitivo, sin lugar a duda una de las maneras más interesantes de compartir conocimiento es por un medio interactivo, sin necesidad de usar un lenguaje completamente técnico o tener que hacer uso de documentaciones densas, aburridas y sin ningún elemento gráfico interesante que se pueda compartir, y recibir conocimiento. Para este fin se decide usar las gafas de realidad virtual Oculus Quest 2, que están clasificadas como una consola de videojuegos, realmente se pueden considerar un nuevo medio de comunicación, las Oculus no solo pueden ser usadas para ello, también para educación, arte inmersivo, experiencias inmersivas e incluso se podría considerar como un nuevo medio de comunicación.

Hasta el momento existen muy pocos proyectos que estén orientados hacia la realidad virtual en la plataforma Oculus y menos aún los proyectos enfocados a las personas con algún tipo de discapacidad, esto debido a las limitaciones que tienen y los requerimientos especiales; sin embargo, cabe mencionar que no es una falta de recursos de los dispositivos Oculus, eso se debe más a la falta de conciencia que existe con estas personas y a la falta de interés por no ser considerados como un público objetivo que contribuya al consumo (compra) de estos equipos.

Dentro de la búsqueda por la universalización del conocimiento se ha encontrado una oportunidad de desarrollo, enfocado en personas con condición de pérdida de capacidad auditiva, bajo este precepto básico que se tiene sobre la inclusión y la necesidad para esta comunidad de interactuar de manera más asertiva con las instituciones, por lo que se ha logrado interpretar la necesidad de continuar avanzando en la posibilidad de realizar un prototipo inmersivo e inclusivo que pueda ayudar a la comunidad sorda a alcanzar los conocimientos necesarios para el aprendizaje de una actividad específica, de forma agradable e interactiva.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Dispositivo hardware

Para poder implementar una correcta metodología de desarrollo de un prototipo de realidad virtual se deben tener en cuenta los dispositivos en los que ejecutará el software, se investigan los orígenes de la realidad virtual en [1], en la que en pocas palabras se define como una serie de interfaces generadas por computador que imitan la realidad.

En la actualidad los dispositivos en los que se desarrolla y se considera para el uso de la realidad virtual son gafas y cascos, descartando la tecnología CAVE [2], la cual consiste en adoptar una habitación con sensores que observan los movimientos del usuario y los transmiten a una computadora que proyecta en las paredes de la habitación la realidad virtual, el beneficio de esta tecnología es que no hay equipos que tenga que cargar el usuario, sin embargo el inconveniente es disponer de una habitación especial con la que no se pueda contar.

Teniendo esto en cuenta las tecnologías un poco más portables y con mejor calidad, se usa HMD o Head-Mounted Display, que se puede traducir como monitor puesto en la cabeza, debido a que estas tecnologías tienen mucha mejor calidad de imagen e incluso mayor opciones de mercado, en cambio las tecnologías CAVE se han orientado más a ser un complemento visual para los teatros en casa o para el uso empresarial.

Entre las tecnologías HMD se descontinuaron los dispositivos que solo funcionaban como transmisor de imagen como las Oculus Rift, esto quiere decir que solamente transmitían la imagen y que dependía de un

cable conectado a una computadora para que esta hiciera el procesamiento del aplicativo y permitiera visualizar la realidad virtual, se crearon nuevos dispositivos todo en uno, con la capacidad de transmitir y procesar las imágenes de realidad virtual. Se elige la opción HMD, aunque también se consideró la opción hacer un aplicativo para dispositivos móviles y visualizar la realidad virtual por medio del dispositivo Cardboard que es básicamente una caja con dos lupas que apuntan a la pantalla de un Smartphone, permitiendo visualizar la realidad virtual. Esta idea se descartó también, debido a la ausencia de controles con los que se puede interactuar con el mundo virtual limitando significativamente las opciones al momento del desarrollo de la aplicación.

Otra de las características que afecta la elección de los dispositivos es el sistema de seguimiento para la interacción con la realidad virtual, se destacan sistemas de seguimiento Inside-Out y Outside-In [3] que se diferencian en la posición de los sensores, en el seguimiento Outside-In los sensores apuntan al usuario y observan los movimientos de este muchas veces, incluso pueden captar los movimientos de los pies del jugador pero cabe mencionar el problema relacionado con la tecnología CAVE, es que requiere la adaptación de una habitación su uso además que la captación de los pies no es muy eficiente. En el seguimiento Inside-Out los sensores se encuentran en el dispositivo y permiten cambiar de lugar donde se usa en cualquier momento, adicionalmente los dispositivos con este sistema tienen una mejor captura de los movimientos de usuario haciendo una VR más inmersiva.

En consideración de todos los elementos anteriores, se opta por desarrollar el prototipo para el dispositivo Oculus Quest 2 debido a que cumple con todas estas características, y además es el de menor costo entre las otras opciones como PlayStation VR u Oculus Go, Este dispositivo tiene como ventaja que está siendo apoyado por la compañía Meta antes conocida como Facebook [4], es una compañía que no depende únicamente de las ventas que pueda tener el dispositivo Oculus Quest 2 por el bajo costo.

2.2 Recursos software

Sabiendo que el dispositivo en el que desarrolla el prototipo es el Oculus Quest 2, se evalúa que software se usará para la codificación. Investigando en las páginas oficiales sobre Oculus [5] y ofrecen tres opciones para el desarrollo del software; la primera opción es el desarrollo nativo, el cual requeriría trabajar directamente con el sistema operativo de las gafas y tendría el inconveniente de ser un proceso largo que se prestaría a errores debido a la falta de experiencia en este campo. Por lo que se opta por el desarrollo en un motor de videojuegos Unreal Engine o Unity debido a que Unreal tiene un enfoque mayor hacia las consolas Play Station 5 y Xbox, mientras que Unity tiene un mejor soporte para dispositivos Android; sistema operativo de las Oculus Quest 2. Finalmente se descarta el uso de Unreal Engine.

Para el modelado 3D se selecciona el editor Blender 3.1.0 siendo de código abierto, no tiene costo y al estar programado en Python, posee una cualidad llamada Blender addons, estos son complementos que crea la comunidad que este posee, algunos ayudan a construir creaciones de arquitectura más precisas y otras se pueden vincular directamente con impresoras 3D, para beneficio del proyecto es que se puede contactar directamente con las Oculus [6], por lo que se puede usar para diseñar directamente el escenario, esto evita que al diseñar en una pantalla se creen elementos que se puedan ver bien en la pantalla de un computador sean desagradables al momento de visualizarlos por medio de las gafas, y adicionalmente que no es necesario exportar el archivo para poder visualizar los modelos 3D en Unity.

El uso de repositorio Git presenta un problema con el tamaño de los archivos por lo que se usa Git Large File Storage LFS que, como se describe en [7], reemplaza archivos grandes como muestras de audio, videos, conjuntos de datos y gráficos con punteros de texto dentro de Git, mientras almacena el contenido del archivo en un servidor remoto como GitHub.com o GitHub Enterprise, lo que permite un manejo más cómodo al momento del uso del repositorio.

3. MÉTODO

La metodología SUM para videojuegos tiene como objetivos desarrollar videojuegos de calidad y optimización de tiempo y costo, así como la mejora continua del proceso para incrementar la eficacia y

eficiencia de esta, pretende obtener resultados predecibles, administrar eficientemente los recursos y riesgos del proyecto, y lograr una alta productividad del equipo de desarrollo.

3.1 Metodología SUM

La metodología utilizada para el desarrollo del prototipo es la metodología SUM, basada en la metodología SCRUM, la cual se adapta a las características de desarrollo de aplicaciones de realidad virtual, se presenta en la Figura 1.

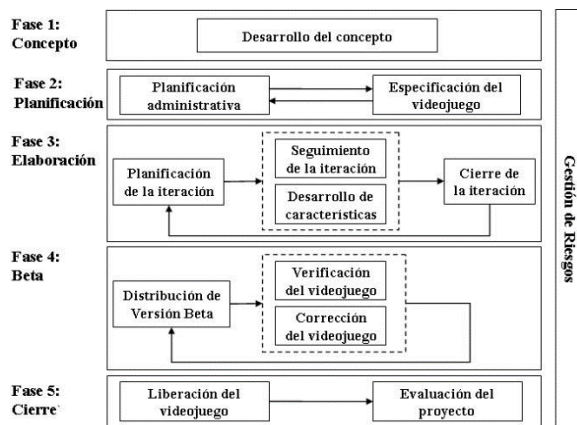


Figura 1. Fases de la metodología SUM

1. *Fase 1: Concepto. Desarrollo del concepto.* En el desarrollo de la aplicación se compondrá de un tutorial básico para la selección de temas que el usuario quiera aprender, entonces inicia la actividad de aprendizaje sé que compondrá de:

- Una explicación del tema que se quiere enseña
- Una explicación de la actividad didáctica
- El desarrollo de la actividad
- Un posible repaso de conceptos de la actividad o fin de la actividad

Una vez termina regresa al menú en el que puede escoger aprender otro tema o salir de la aplicación. (diagrama de secuencia)

El público objetivo son estudiantes de educación media y superior con edades mayores a 15 años oyentes y sordos, esto implica que el género temático debe ser congruente con personas de estas edades, se entiende por género temático como la manera en que se narra una historia ejemplos de esto pueden ser: de terror, fantasía, superhéroes y demás, teniendo esto en consideración los géneros más generalmente aceptados son Animación, Aventura, Comedia y Familiar, lo que permitiría poder Ampliar el público objetivo.

Basándose en la experiencia de usuario de varios videojuegos se evidencia que los que tiene más aceptación para las actividades lúdicas utilizan modelados 3d o como se conoce low poly que tienen como características principales modelados poco detallado en los que se puede ver a simple vista los ángulos de los modelos 3d

Para evitar accidentes lo mejor es que el usuario no se necesite mover, debido a que es común que se olvide que está en un videojuego de realidad virtual y por instinto camine en la vida realidad olvidado hacerlo por medio de los controles de los Oculus por esto el desarrollo de las actividades de harán desde un solo punto y no habrá necesidad de que el jugador se mueva en el escenario de realidad virtual

La mejor estrategia de desarrollo para este aplicativo sería el método de gamificación con elementos interactivos para el aprovechamiento de los elementos de realidad virtual, lo que quiere decir que el escenario debe contener elementos con los que se pueda interactuar (sujetar, mover, presionar, tirar)

Para que la aplicación sea accesible a la comunidad sorda se debe tener en cuenta que, las dificultades de comunicación verbal y escrita de las personas con sordera parcial o total por esto se tiene que evitar el uso de palabras complejas o textos excesivamente largos e implementar simbolismos que comuniquen al usuario su progreso en el juego, como una marca de comprobación para las tareas realizadas correctamente y una equis para las que no fueron realizadas correctamente

2. Fase 2: Planificación

- *Planificación Administrativa.* En esta fase se determinan las herramientas para el desarrollo del aplicativo, se define el motor de videojuegos Unity, el lenguaje de programación C#, y para el modelado 3D se usa Blender.
- *Especificación del Videojuego*
 - *Características de Oculus.* Seguimiento de dentro a fuera, esto quiere decir los sensores de movimiento se encuentran en el visor, el otro tipo de seguimiento son de afuera hacia dentro como los HTC vive pro en el que los sensores se instalan en una habitación apuntado al usuario y estos registran los movimientos, la única ventaja de este último es que se pueden registrar los movimientos de los pies del jugador sin embargo los que existen hasta la fecha son muy eficientes en esto. El sistema operativo de las Oculus sistema operativo Android que tiene mayor presencia en dispositivos móviles.
- *Pasos para desarrollar en Oculus*
 - Se debe tener una cuenta de facebook teléfono Android para el desarrollo con la aplicación oficial de Oculus y usar la cuenta en facebook para abrir la aplicación o crear una cuenta poner las gafas en modo desarrollador.
 - Descargar las Oculus setup: <https://www.oculus.com/rift/setup/>
 - Requerimientos de la computadora.
 - Cable tipo o USB 3.0 o conexión WiFi para Usar Oculus airlink.
 - Descargar el administrador de proyectos de Unity hub e instala desde este el editor de código de Unity que pueda soportar el desarrollo de Oculus las cuales son las versiones del año 2019 en adelante con soporte para desarrollo en dispositivos Android (Android Build Support) y las librerías de desarrollo en Android (Android SDK & NDK Tools and OpenJDK) justo como se muestra en la imagen.

En la Figura 2 se muestran características técnicas del motor de videojuegos Unity, necesarias para su instalación.

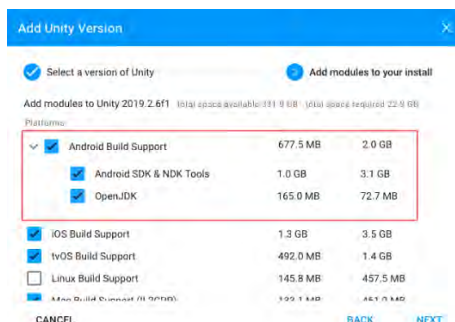


Figura 2. Instalaciones necesarias para las versiones de Unity

3. Fase 3: Elaboración

- Planificación de la iteración y Seguimientos de la iteración, desarrollo de las características:

- Uso de Git Large File Storage LFS, herramienta para la subida de archivos grandes a GitHub que por su tamaño normalmente no lo permitiría.
- Creación del prototipo de videojuego.

- Cierre de la iteración

4. Fase 3: Beta

- Distribuciones de versión Beta.
- Verificación y corrección del videojuego.

5. Fase 4: Cierre

- Liberación del videojuego.
- Evaluación del proyecto.

La ejecución de la metodología para el desarrollo del prototipo se ha implementado hasta la Fase de Elaboración, realizando durante el desarrollo de las características, las pruebas con especialistas y usuarios, que han permitido observar las ventajas que presenta el prototipo.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con el desarrollo del prototipo de realidad extendida se han comprobado los resultados positivos en los estudiantes con y sin discapacidad auditiva en el aprendizaje de la lógica de programación, debido al componente sensorial que tiene un efecto de compresión y recordación alto. Por el carácter inmersivo de la realidad extendida, combinación de la realidad virtual y aumentada, el estudiante se convierte en un participante activo del proceso de enseñanza-aprendizaje. La manipulación de los componentes de esa realidad paralela, que elimina las barreras físicas, y desarrolla las competencias y habilidades de cada estudiante a su ritmo y de forma personalizada, en un gran aporte del prototipo.

4.1 Usuario como ente activo

Al momento de presentar ese software a un usuario en condición de pérdida auditiva se debe cuidar del canal de comunicación, la forma de comunicación, y la asertividad que se tenga influirá en cómo se reciben críticas constructivas para el mejoramiento del software, para poder continuar con una correcta evolución del proyecto se debe estar atentos a la retroalimentación del usuario final, permitiendo realizar ajustes y correcciones que contribuyan al mejoramiento continuo y las futuras versiones del aplicativo.

Se toman las recomendaciones del usuario para el software buscando conseguir una mejora en algún apartado del proyecto como puede ser el apartado gráfico o el apartado técnico, se agrega a la beta a manera de corrección, se vuelve a verificar con una prueba y se repite el procedimiento hasta llegar a un punto donde se pueda liberar el software. En la Figura 3 se presenta un usuario especialista usando las Oculus Quest.



Figura 3. Uso de Oculus Quest 2 por un usuario experto

Respetando el ciclo de vida del software se puede llegar a la mejoría de un proyecto o un servicio, por esta razón se debe estar atento a las continuas actualizaciones del software de desarrollo usado, con más herramientas para el mantenimiento, protección, optimización y cuidado del proyecto estipulado. Anticiparse a las posibles respuestas del usuario para llegar a dar una solución eficiente a algún problema que surja en algún proceso posterior a la liberación del juego es necesario tenerlo presente desde el primer momento de ejecución del proyecto.

4.2 Elementos

En la Figura 4 se logra apreciar cómo se utilizan colores simples y formas con pocas esquinas y curvas, todo esto para darle a entender al usuario que está en un ambiente cómodo y tranquilo en el cual puede desarrollar sus actividades sin ninguna distracción y sin ningún estímulo externo que lo distancie de su objetivo.



Figura 4. Ejemplo de diseño simple

Cuidar el ambiente del usuario no es solo crear la cantidad necesaria de objetos para cumplir el cometido, sino que estos objetos se adecuen correctamente a lo que como desarrolladores se busca, crear una sinergia entre estos y mantener una estética óptima es lo que desemboca en la comodidad de un usuario.

En este caso de ejemplo se quiere desarrollar un proyecto con una estética afable y entendible para todo público, como el prototipo desarrollado.

Las mejores opciones para no estresar la capacidad de las gafas, mientras se mantiene la intencionalidad gráfica es el uso de los elementos bajo la estructura de los elementos Low poly (Pocos poligonos) como se puede observar en la Figura 5.

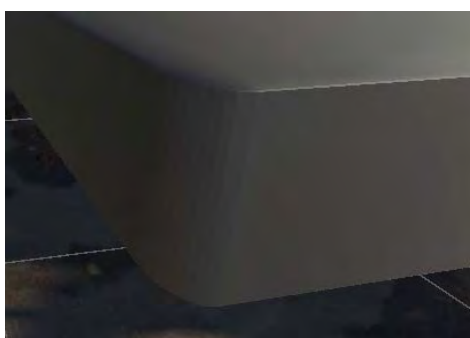


Figura 5. Ejemplo de Low poly

Los elementos Low poly como se mencionó antes permiten mantener con unos ángulos simples la forma de un objeto, gracias a esta simplicidad es sencillo de entender tanto para el motor de juegos que crea los gráficos como para el usuario.

Al analizar las posibles respuestas dadas por el usuario común y el usuario en condición de pérdida auditiva se concuerda con que una forma óptima de representar los conceptos es mediante elementos gráficos simples con poca información por si solos, de ser necesario abarcar un concepto complejo se utilizan conexiones a otros elementos para poder dar una información ampliada del funcionamiento de cada elemento dentro de un conjunto de conceptos como se observa en la Figura 6.

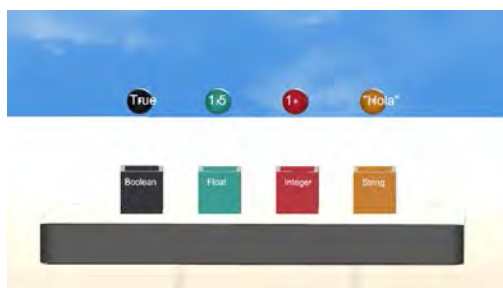


Figura 6. Uso de diferentes elementos para la explicación de un concepto complicado

4.3 Desarrollo de videojuegos

Al desarrollar videojuegos se pueden usar varios tipos de elementos con distintas configuraciones que proporcionan sensaciones al usuario. Mantener al jugador entretenido mientras aprende es parte esencial de la experiencia que va a vivir, la realidad virtual trae la posibilidad de experimentar de manera continua una inmersión en un mundo de distinta lógica y características al mundo real, las sensaciones dadas por este mundo son lo que mantiene al jugador atento al conocimiento que se le imparte, si no se logra transmitir conocimiento no se hace nada característicamente distinto a la educación tradicional.

Basado en lo anterior se utilizan texturas, formas y elementos que inciten al jugador a interactuar con estos, de manera independiente al proceso académico se busca que el jugador quiera estar en el mundo creado y desee experimentar cada posibilidad y cada objeto que encuentre.

En la Figura 7 se puede apreciar como los distintos elementos se fusionan con la interactividad y con solo ver una imagen puesta o con colocar un shader de luz en algún objeto se invita al usuario a interactuar. Las explicaciones y la contextualización invitan a manejar una lógica dentro de ese mundo (nótese la imagen que está en la mesa de la Figura 7, indica como interactuar con los objetos del mundo).

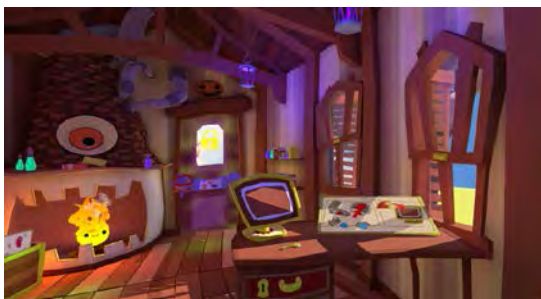


Figura 7. Ejemplo de juego

El prototipo basado en algorítmica para estudiantes de las facultades de ingeniería, crea varios niveles en los que los estudiantes pueden navegar por diferentes temas, presentando conceptos y ejemplos específicos que sirven de guía para que los estudiantes puedan interpretar los datos, la simbología de los diagramas de flujo y realizar retos o actividades con puntuación, buscando que cumplan con los objetivos del conocimiento establecidos en este tipo de cursos. El resultado final del prototipo es desarrollar habilidades de programación en los estudiantes de los primeros cursos de programas de ingeniería y tecnología mediante la inmersión.

4.4 Interacción con el usuario (Gamificación)

En [8] se define la gamificación como el uso de diseños y técnicas propias de los juegos en contextos no lúdicos con el fin de desarrollar habilidades y comportamientos de desarrollo. En el desarrollo del prototipo se emplean diseños propios para activar la participación de los estudiantes mediante retos que resultan en puntos positivos para su aprendizaje.

Cuando un usuario u objeto realiza una acción, una manera de hacer saber que está se efectuó que tuvo algún impacto en el mundo es con un *feedback* que puede representarse de manera visual, auditiva, o por

medio de las vibraciones del control: Al estar enfocados en realizar un proyecto inclusivo, una forma de transmitir los *feedback* es el audio, pero en el caso de personas con capacidad auditiva, se debe usar un medio más universal como un aviso que muestre que se está efectuando la acción.

Tanto los objetos como el usuario pueden realizar acciones que activen estos *feedback* programados, pero no solo es importante que existan, estos pueden complementar un proceso de gamificación.

La gamificación es un método para conseguir mejores resultados, nuevos conocimientos, mejorar alguna habilidad o recompensar un logro. Con eso se logra que el jugador se interese más en el mundo y en completar cada reto que se le presente de una manera procesual.

En la Figura 8 se puede ver como la gamificación premia un estímulo del usuario (el caldero realiza sonidos para indicar que este encendido), al momento de ocurrir esto el usuario siente que está realizando un progreso dentro del proceso realizado. Como se mencionó antes los *feedback* se pueden realizar por distintos medios, es decir que se pueden crear distintos *assets* que sirvan exclusivamente para premiar al usuario o indicarle algo, comúnmente son *shaders*, partículas, animaciones, halos, *projectors*, *trails* y *rails* renders.



Figura 8. Ejemplo de Gamificación (como premio a un estímulo del usuario el caldero realiza sonidos)

4.5 Assets y Plugins recomendados

Un asset representa cualquier modelo 3D, archivo de audio, imagen, o cualquier tipo de archivos que soporta Unity que son utilizados en los juegos. Así como los assets, en la construcción de videojuegos se requiere de plugins o complementos que mejoran las capacidades de un software.

Como se ha podido apreciar por medio de los puntos anteriores, son necesarios muchos assets y hay muchos tipos de objetos e interacciones en los proyectos Unity, para reducir la carga de hacer manualmente cada uno de estos assets mientras se añade funcionamiento de manera rápida y versátil, se suelen usar distintos plugins y paquetes de assets.

Para poder usarlos solo es necesario encontrarlos en la plataforma de Unity, cumplir con los requisitos legales de cada una de las licencias que estos llevan, después de esto se puede hacer uso de infinidad de recursos para mejorar la funcionalidad (recomendamos uso de plugins y assets creados por Unity, estos suelen estar bien documentados y muy bien hechos).

En este prototipo se han usado paquetes de licencias de código abierto para agilizar la realización de proyectos de realidad virtual (XR Interaction Toolkit, XR Plugin Management), así como paquetes de assets con algunos scripts y modelados donde ya se podía encontrar un juego base con una variedad de objetos con los que se puede interactuar. El paquete principal usado fue VR Beginner: The Escape Room, que se puede observar en la Figura 9.

4.6 Código del proyecto

Para la creación de un proyecto complejo es necesario el uso de la programación, esta organizará los eventos y hará interactivos los sistemas de objetos planteados.



Figura 9. Paquetes de plugins basicos para la realización de un proyecto interactivo. nótese el XR Interaction Toolkit y XR Plugin Management

La Figura 10 muestra la integración del motor de videojuegos con archivos CS de programación, en el procedimiento se evalúa que un collider tenga contacto con una esfera la cual tiene un valor en su etiqueta, al momento de ingresar la esfera en el collider hay un proceso de gamificación por medio de un sistema de partículas, la cual avisa cuando todo funciona de manera correcta.

```

1  using System.Collections;
2  using System.Collections.Generic;
3  using UnityEngine;
4
5  public class TabVerdLogica : MonoBehaviour
6  {
7      public ParticleSystem[] SparkleFuseVFX;
8
9      private bool respuesta=false;
10     private bool valorSphere;
11
12
13     private bool m_SpherePresent;
14
15     private Vector3 initialPos = new Vector3(0.382f, 0.78f, -6.213f);
16
17     // Cuando la esfera entra en contacto con el socket
18     void OnTriggerEnter(Collider other)
19     {
20         m_SpherePresent = true;
21         if (other.gameObject.name=="True")
22         {
23             Debug.Log("Se ingreso la esfera True");
24             valorSphere = true;
25         }
26         if (other.gameObject.name == "False")
27         {
28             Debug.Log("Se ingreso la esfera False");
29             valorSphere = false;
30         }
31     }
32
33     // Cuando la esfera se mantiene en el socket
34     void OnTriggerStay(Collider other)
35     {
36         if (respuesta)
37         {
38             respuesta = true;
39             other.gameObject.transform.localPosition = Vector3.zero;
40         }
41         else { other.gameObject.transform.position = initialPos; }
42     }
43     // Cuando la esfera Sale del socket
44
45
46     void OnTriggerExit(Collider other)
47     {
48         m_SpherePresent = false;
49     }
50
51     public void BooleanSocketed(bool valor)
52     {
53         if (m_SpherePresent)
54         {
55             if (valorSphere == valor)
56             { respuesta = true; }
57             else { respuesta = false; }
58
59             foreach (var s in SparkleFuseVFX)
60             {
61                 s.Play();
62             }
63         }
64     }
65 }

```

Figura 10. Código de Unity integrando los sockets brindados para realidad virtual

4.7 Reflexiones en el desarrollo del proyecto

La creación del prototipo es necesaria para demostrar la efectividad de la enseñanza de los conceptos relacionados a la programación por un medio distinto, el medio de transmisión y el método de enseñanza brindado son necesarios para hacer una diferenciación entre la educación común y corriente a un medio sintético de inmersión.

La capacidad de aprender de una persona la cual este en condición de pérdida auditiva es indiferente al método de aprendizaje que utilice, apoyar el talento personal de cada individuo es mostrarles una vía para llegar al conocimiento, tener la oportunidad de educarse es un derecho, evitar que se vulnere este derecho es una motivación para cualquiera que desarrolle la línea de estudio enfocadas en metodologías necesarias para la educación inclusiva.

Los retos a completar no están enfocados a tratar a una persona como menos que otras por usar un medio distinto de comunicación, se enfoca en buscar el punto de intersección entre los medios de comunicación para llegar a un marco de trabajo donde dé como resultado poder entregar el conocimiento de buena manera para cualquiera. Es indignante tratar de manera infantil a las personas que se relacionan distinto o menos preciar la capacidad de estos al realizar alguna tarea, se debe plantear una distinción entre la infantilidad de un concepto y simplificar estos, una cápsula con un número por ser usada para explicar a infantes no significan que sean que son infantiles, significan que son entendibles para todo público.

Generalizar un concepto a su punto más básico de simplicidad da paso a entender a la mayoría de personas, a entender su significado, esta es la misión de cualquiera que busque desarrollar para un público con un medio de comunicación distinto.

5. CONCLUSIONES

En este proyecto se han establecido los principios y beneficios que la realidad virtual mixta presenta en diferentes ámbitos del proceso de enseñanza-aprendizaje. Los aportes teóricos han servido para definir las especificaciones del videojuego, aportando y contrastando al proyecto.

El desarrollo del prototipo confirma el uso de la realidad mixta y sus elementos de forma acertada, en procesos educativos que sirven de apoyo en la presencialidad y en la virtualidad, permitiendo un aprendizaje personalizado, al ritmo de los estudiantes con y sin discapacidad auditiva.

Desde las facultades de ingeniería se deben estructurar los contenidos de los cursos de programación para que se articulen con la lógica matemática, y con el proceso de aprendizaje de estudiantes con discapacidad auditiva, con el fin de asegurar la inclusión de comunidades con capacidades limitadas y generar nuevos paradigmas de comunicación.

Los procesos de enseñanza-aprendizaje necesitan una profunda reestructuración e innovación, por lo que se requiere aplicar nuevas metodologías, estrategias, didácticas y actividades multidireccionales para potencializar las habilidades de los estudiantes, pensando en la diversidad de inteligencias y capacidades.

Se debe definir claramente la articulación de los procesos de aprendizaje en ingeniería con el marco de evaluación de los resultados enfocados en las capacidades lógico-interpretativas y abstractivas para analizar, comprender y construir software.

Luego de la revolución tecnológica del siglo XX el Nuevo Orden Mundial impactó todas las áreas del desarrollo social, entre ellas la educación. Hoy hay que considerar a la tecnología como un aliado para enseñar y potencializar las matemáticas como fundamento de la lógica de programación.

Los profesores deben pasar de los ejercicios a los problemas para capacitar en matemáticas, con el fin de potencializar e innovar el conocimiento de los estudiantes. Una alternativa, es la de utilizar el Aprendizaje Basado en Retos y en Proyectos, para que se conecten las matemáticas con la lógica de programación en desafíos que permitan avanzar de nivel.

El prototipo de realidad extendida propuesto en la investigación, está estructurado en retos, en coherencia con los niveles de conocimiento que se organizan para el aprendizaje de la lógica de programación.

La inclusión no solo se puede quedar en pretensiones o buenas intenciones, se debe trabajar realmente para aprovechar los avances técnicos y tecnológicos como la realidad extendida para generar espacios que

permitan la participación más agradable, interactiva, oportuna y cercana de los estudiantes con algún tipo de limitación.

REFERENCIAS

- [1] Fuchs P. et al. (2011). Virtual Reality: Concepts and technologies. CRC Press.
- [2] Fandáková M., et al. (2020). Mejoras del entorno virtual asistido por ordenador (CAVE). En 43 Convención Internacional sobre Tecnología de la Información, las Comunicaciones y la Tecnología Electrónica (MIPRO). Opatija, Croacia.
- [3] Sánchez G. (2020). Diseño e implementación de un explorador de archivos DICOM para realidad virtual y aumentada. Trabajo de grado. Universidad de Valladolid.
- [4] Info about meta. (2020). Meta. Recuperado: <https://about.facebook.com/ltam/company-info/>
- [5] Oculus documentation. (2021). Oculus for developers. Recuperado: https://developer.oculus.com/documentation/?locale=es_LA
- [6] VR Scene Inspection. (2019). Blender.org. Recuperado: https://docs.blender.org/manual/es/latest/addons/3d_view/vr_scene_inspection.html
- [7] Git Large File Storage. (2020). Git. Recuperado: <https://git-lfs.github.com/>
- [8] Burke B. (2012). Gamification 2020: What is the future of gamification? Gartner.

Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era

Edición 1

En este libro se describe cómo lograr una ingeniería para el desarrollo y la supervivencia de la humanidad en la Nueva Era, siguiendo caminos naturales o artificiales verdaderamente sostenibles. Los autores utilizan métodos desarrollados en varias áreas con fines de sostenibilidad, desarrollo y adaptación, tales como modelos matemáticos, selección de materiales y energía renovable; además, prueban los principios de la ingeniería en diversos trabajos prácticos y casos de estudio que el lector encontrará de fácil replicación y aprovechamiento en otras áreas, tanto ingenieriles como científicas.

