



**Editorial
IAI**

Prof. Edgar Serna M. (Ed.)

DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA

Cuarta Edición

**Medellín - Antioquia
2019**

Prof. Edgar Serna M. (Ed.)

Desarrollo e Innovación en Ingeniería

Cuarta Edición

ISBN: 978-958-52333-0-0

© 2019 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación



Desarrollo e innovación en ingeniería [recurso electrónico] / Edgar Serna M., ed. -- 4a. ed. --
Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación, 2019.
p. 568 -- (Ingeniería y ciencia)

Archivo en formato pdf (15 Mb). -- Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-52333-0-0

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

CDD: 620 ed. 23

CO-BoBN- a1047651

Investigación Científica
ISBN: 978-958-52333-0-0

Desarrollo e Innovación en Ingeniería
Serie: Ingeniería y Ciencia
© Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Cuarta Edición: agosto 2019
ISBN: 978-958-52333-0-0
Publicación electrónica gratuita

Copyright © 2019 Instituto Antioqueño de Investigación IAI™. Salvo que se indique lo contrario, el contenido y distribución de esta publicación está autorizado bajo [Creative Commons Licence CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Edición general: Instituto Antioqueño de Investigación IAI
Diseño: IAI, Medellín, Antioquia.
Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas registradas 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, y no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este documento.

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación
Instituto Antioqueño de Investigación IAI
<http://fundacioniai.org>
contacto(AT)fundacioniai.org

Presentación

Las diferentes disciplinas ingenieriles avanzan cada año en cuanto a desarrollos y descubrimientos que, con el soporte de la ciencia, le brindan mejores alternativas de vida a la sociedad. Aunque ya sea por mal uso o por intereses comerciales, esas alternativas no siempre logran su objetivo. En todo caso, en esta edición de *Desarrollo e Innovación en Ingeniería* presentamos los resultados del trabajo de una serie de investigadores en áreas como las Ciencias Computacionales e Ingenierías como la Civil, Química, Electrónica, Mecánica, Ambiental e Industrial, y cuyo aporte engrandece al cuerpo de conocimiento de esta disciplina.

El lector podrá encontrar datos, referencias, información y procesos con los que esperamos pueda responder a sus inquietudes en relación con la ingeniería, además de proyectar su trabajo académico e investigativo. Esto es posible gracias a que el contenido de este libro se estructura de forma secuencial por área ingenieril, mostrando los procesos y métodos de investigación que hicieron posible los resultados y que sus autores plasman en cada uno de los capítulos.

Como libro resultado de investigación estamos seguros de que será de gran utilidad para el lector, por la versatilidad del contenido y porque los investigadores y académicos, que publican en esta cuarta edición, se esforzaron al máximo para cumplir con las exigencias de la revisión técnica y, posteriormente, con las observaciones de la revisión científica a la que se sometió el presente texto.

Consiste pues de una obra maravillosa y agradable en su lectura, en la que tanto los profesores como los investigadores y estudiantes encontrarán una fuente de información que, en la medida que analicen y entiendan su contenido, podrán convertir en conocimiento y sacar el mejor provecho del mismo. Los autores de los capítulos estarán atentos a responder sus inquietudes y a entablar, en la medida de lo posible, una relación de trabajo que conlleve a nuevas etapas de trabajo o a nuevas formas de validación de los resultados.

Esperamos entonces que el libro se ajuste a sus necesidades y que se distribuya entre la comunidad, ya que su publicación es libre y, como las ediciones anteriores, se puede descargar sin ninguna restricción desde el sitio de la Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.

Contenido

	Pág.
Un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software Adriana Maulini, Luciano Straccia, Florencia Pollo C.	5
Revisión de enfoques y comparación de recursos para el análisis de sentimientos en español en Twitter Víctor Rojo, Paola Britos, Florencia Pollo C.	17
Predicción del tráfico de una red inalámbrica basada en redes neuronales artificiales mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt Ramiro Osorio D., Martha Y. Segura R., Mauricio A. Villalba	27
Estudio de perfiles de los tesis de las carreras de grado de Informática de la Universidad de Morón, Argentina Marisa Panizzi, Iris Sattolo, Javier Lafont, Nicolás Armilla	37
Hacking en servicios Web a través de redes WiFi abiertas Francisco C. Valle D., Carlos S. Herrera G., Cristian S. Pedraza C.	49
Análisis bibliométrico al desarrollo de software: Tendencias de investigación Francisco Clemente V., Paulo A. Gaona G., David A. Guerreiro P.	58
Estrategia para conectar las necesidades de la industria con los proyectos de aula de los ingenieros de sistemas: Alianza Globant-Universidad de Medellín Samayda Herrera, Liliana González P., Juan Guillermo F., Mario Luna del R.	74
Una aplicación móvil de Realidad Aumentada para la enseñanza de la gestión de almacenes en logística Juan D. Bernal P., Jorge Bacca, Julio M. Daza E.	85
Diseño de un algoritmo para solución de un problema de secuenciación de N tareas en M máquinas mediante la combinación de las reglas de despacho Earliest Due Date y Longest Processing Time en un ambiente de manufactura flexible Germán Cock S., Harold S. Cardona Z., Pedro D. Medina V.	96
Desarrollo de una herramienta computacional para el análisis de deformación debida a una carga perpendicular en estructuras tipo sándwich fabricadas en material compuesto Daniel Agudelo, Jorge E. Gaitán A., Daniela Sacristán M.	105
Caracterización de las propiedades mecánicas a compresión de estructuras tipo sándwich con núcleo celular manufacturadas bajo técnica de deposición fundida Daniel Agudelo, Fabio A. Merchán R., Sebastián Nieto, Sebastián Rodríguez	120
Una revisión técnico-ambiental de la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura residual en Colombia Juan C. Acevedo P., Luis C. Becerra O., Astrid Z. Acevedo R., Fausto R. Posso R.	132
Aplicación del método de balance de energía metal/molde para la determinación del calor latente de solidificación y la evolución de fracción sólida de una aleación Al-7.5%Si Carlos González R., Adrián M. Amaro V.	144
La importancia de los catalizadores en la gasificación de biomasa: Una revisión de la literatura Juan C. Acevedo P., Erika Arenas C., Zulamita Zapata B., Fausto R. Posso R.	153
Efectos de la radiación ultravioleta en la guadua Olga L. Vanegas A., Flor N. Díaz P., Luis Francisco P.	172
Aprovechamiento de condensados de aires acondicionados en climas cálidos para riego automatizado de jardines impulsado por energía solar José C. Galindo G., Carlos E. Arrieta G., Iván Mora U., Iván Maestre A.	177
Vigilancia tecnológica para orientar la enseñanza de la geometría en Ingeniería Civil con apoyo de TIC John J. García M., Sonia J. Moreno J.	195
Análisis del comportamiento a largo plazo de un puente viga cajón construido por voladizos sucesivos en Colombia a partir de deflexiones medidas en campo Luis F. Rincón P., Álvaro Viviescas J., Gustavo Chio C., Edison Osorio B., Carlos A. Riveros J.	203
Comportamiento sísmico de muros delgados de concreto reforzado en zona de amenaza sísmica alta Érica L. Arango P., William Valencia M., Álvaro Viviescas J., Oscar J. Begambre C., Gustavo A. Ospina I.	211
Principios metodológicos para el desarrollo de un plan tecnológico de renovación de balasto de una vía ferroviaria: Revisión sistemática de la literatura Jhoan A. Navarro T., Leonel F. Castañeda H., Silvana Montoya N.	219
Localización automática de vehículos de transporte escolar y monitoreo y control de ingreso y salida de estudiantes mediante la integración de tecnologías GPRS, GPS, Arduino y RFID Félix R. Gómez D., Edgar F. Rodríguez V., Guillermo F. Valencia P.	230
Metodologías para la construcción de un modelo prospectivo para la implementación de redes móviles 5G en Colombia Félix R. Gómez D., Guillermo F. Valencia P., Edgar F. Rodríguez V.	240
Sistema IoT para medición y monitoreo de variables medioambientales en la agricultura inteligente Arnold López S., Christian D. Bohórquez M., Ricardo C. Gómez V.	251

Plan de acción para un Laboratorio de Soluciones Tecnológicas a nivel de educación superior: Caso facultad de ingeniería de la Universidad de Medellín Liliana González P., Mario A. Luna del R., Mauricio González P., Jenny Cuatindioy I.	260
Tendencias investigativas en servicios en redes de telecomunicaciones Carlos A. Gómez R., José L. Arciniegas H.	269
Navegación de un robot móvil autónomo aplicado a la agricultura de precisión: Principios y aplicaciones de geolocalización en un cultivo de prueba Ángel A. Rodríguez A., John A. Figueredo L., Juan A. Chica G.	280
Estudio de eficiencia del alumbrado público en la ciudad de Villavicencio Jefferson Parra C., Pedro L. Muñoz O., Luis M. Pulido O.	290
Caracterización y monitoreo de la radiación solar, índice UV y temperatura en el parque metropolitano María Lucía, vereda La Llanerita, Apiay, Villavicencio Pedro L. Muñoz O., Luís M. Pulido O., Jefferson Parra C.	303
Segmentación y análisis de imágenes termográficas para la detección de cáncer de mama Diannys Granadillo B., eeYaileth Morales, Cesar Torres M., Eberto Benjumea	316
Implementación de tecnologías basadas en Inteligencia Artificial para el análisis de la conducta de robots móviles autónomos en espacios de configuración en colisión Alejandro Armando H., Emanuel Maximiliano A.	324
Modelos de madurez de la gestión de la seguridad y salud en el trabajo Yuber L. Rodríguez R., Harold Hernández C., Magda V. Monroy S.	336
Referentes conceptuales de transferencia de conocimiento y tecnología en Instituciones de Educación Superior: Una revisión sistemática de la literatura Neira Y. Figueroa G., Lizeth F. Serrano C., Hugo F. Castro S.	347
Análisis de tendencias investigativas asociadas a la Industria 4.0 Mary A. Mendoza P., Lizeth F. Serrano C., Ivanhoe Rozo R.	358
Entendiendo el concepto de Innovación Social y las tendencias investigativas asociadas: Revisión de literatura Diana K. Parrado H., Lizeth F. Serrano C., Hugo F. Castro S.	370
Nivel de implementación de prácticas Gestión de la Calidad Total en pequeñas empresas colombianas Stanley D. Álvarez E., Daniel A. La Rotta F.	381
Tendencias de la investigación en producción y logística: Un análisis bibliométrico Lindsay Álvarez P., William Camilo R., Alejandro Guerrero P.	392
Tendencias en la toma de decisiones en ingeniería de servicios Eduyn López S., William C. Rodríguez V., Alejandro Guerrero P.	401
Evaluación de una metodología de generación de ideas de negocio basado en patentes libres Jonathan D. Morales M., Eduwin A. Flórez O., Marta E. Carreño G., Andrea C. Patarroyo R.	422
Identificación de las causas de variación en los procesos de esterilización de un hospital privado a través de la metodología Six SIGMA: Fases definir – medir Ivanhoe Rozo R., Ivon A. Vanegas R., Lizeth F. Serrano C., Mary A. Pérez M., Flor N. Díaz P.	434
Aplicación del ciclo de vida Business Process Management al proceso de poscosecha en una empresa de flores Claudia Y. Rodríguez R., Angie P. Mondragón A.	450
Recubrimiento tipo carburo de Tantalio y carburos de Hafnio con capa intermedia de oro para elevar la resistencia a procesos corrosivos Willian Aperador C., Pablo A. Guillermo G., Jorge H. Bautista R.	458
HYNMERS: Diseño de un sistema mecánico pasivo para rehabilitación de miembros inferiores inspirado en terapia acuática Sergio Zapata V., Manuel J. Betancur, Vera Z. Pérez, Juan C. Yepes, Juan C. Franco M.	469
Tendencias investigativas en ingeniería mecatrónica: Un análisis bibliométrico Hernán González A., Daniel F. Peñarete M., Hugo F. Lobatón G.	482
Caracterización mecánica a tensión de impresiones 3D de PLA y ABS modeladas por deposición fundida Daniel Agudelo, David Díaz, Andrés Ibarra, Carlos Cruel, Miguel Montoya, Camilo Hernández	497
Incidencia de las condiciones atmosféricas sobre tecnologías de enfriamiento húmedo y seco para sistemas de refrigeración de centrales de generación de energía Frank Ortiz G., Andrés F. Colorado G., Sergio C. Agudelo F.	508
Análisis termoeconómico del distrito térmico La Alpujarra en Medellín Juan D. Amariles L., Sergio C. Agudelo F., Andrés F. Agudelo S.	519
Marco legal para la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público en Colombia: Una perspectiva de sostenibilidad Tatiana C. Fragozo G., Sneyder Pastrán S., Leonel Castañeda	533
Efecto de un postratamiento térmico en un acero microaleado con diversos procesos termomecánicos Itzel Reyes, Adair Jiménez N., Bernardo Campillo	546

Un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software

Adriana Maulini¹

Luciano Straccia²

Florencia Pollo C.³

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires – Argentina

El conocimiento es uno de los recursos estratégicos más importantes de una organización. Una eficiente administración de este recurso permite obtener ventajas competitivas, por ello la Gestión del Conocimiento (GC) cobra vital importancia. Sin embargo, existen rubros donde gestionar el conocimiento presenta desafíos particulares, entre ellos la Ingeniería de Software, y especialmente en las fábricas de software, las cuales incorporan además problemáticas típicas de este tipo de organización. Este trabajo presenta conceptos vinculados con el conocimiento, gestión del conocimiento, fábricas de software y algunos modelos de gestión del conocimiento. Además, identifica los principales 15 desafíos que dificultan la GC en el tipo de organización mencionado y propone un modelo de gestión del conocimiento aplicable a este tipo de organizaciones en función de los desafíos identificados, presentando las diferentes etapas que conforman este modelo y las actividades requeridas en cada una de ellas.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los recursos estratégicos más importantes en las organizaciones actuales es el conocimiento. Si este se administra o gestiona de forma adecuada, se pueden obtener ventajas competitivas. Al igual que otros rubros, la Ingeniería de Software y específicamente, las fábricas de software necesitan de los beneficios de la Gestión del Conocimiento. Según Aurum y otros [1], los desarrolladores de software procesan conocimiento dinámico y de alto valor que, en muchos casos, se trata de conocimiento implícito y debido a su complejidad es difícil convertirlo en explícito. Las fábricas de software que pertenecen a la categoría de pequeñas y medianas empresas además incorporan las problemáticas asociadas a este tipo de organizaciones.

En lo que respecta a la localización geográfica de la producción de software en la República Argentina, alrededor del 80% se localiza en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) y el 20% en el resto del país [2]. A partir de las dificultades para implementar modelos de gestión del conocimiento en las fábricas de software, con sus propias características diferenciales respecto a las problemáticas que presentan otro tipo de organizaciones, el Grupo de Investigación en Metodologías de Ingeniería de Software (GEMIS), dependiente del Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información (DISI) de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN.BA) lleva adelante un proyecto denominado “La gestión del conocimiento en pequeñas y medianas fábricas de software en el Área Metropolitana de Buenos Aires” [3] que busca indagar cuál es el grado de implementación de gestión del conocimiento en las pequeñas y medianas fábricas de software del AMBA, cuáles son los problemas presentes en este tipo de implementaciones y qué modelos de gestión del conocimiento se podrían proponer para que las pequeñas y medianas fábricas de software de la región pudieran implementarlos. En [4] se presenta una aproximación a un modelo de gestión del conocimiento aplicable a pequeñas y medianas fábricas de software. En este trabajo se detalla el modelo de gestión, con sus definiciones de procesos y la presentación de los artefactos generables y utilizables en cada etapa.

2. MÉTODO

2.1 Hipótesis

En este trabajo se presentan resultados parciales del proyecto de investigación. Este proyecto define como hipótesis que las pequeñas y medianas fábricas de software tienen dificultades para implementar modelos de gestión del conocimiento, ya que tienen características diferenciales con respecto a otro tipo de organizaciones. Tal como afirma Hernández [5] “las hipótesis de trabajo cualitativas son pues, emergentes, flexibles y contextuales, se adaptan a los datos y avatares del curso de la investigación”, por lo cual la hipótesis resulta relevante para el inicio de la investigación, aunque podría irse adaptando según los resultados que se fueran obteniendo. Las preguntas que guían el proyecto de investigación son ¿cuál es el grado de implementación de gestión del conocimiento en las pequeñas y medianas fábricas de software del AMBA?, ¿cuáles son los problemas presentes en esta implementación? y ¿qué modelos de gestión del conocimiento se podrían proponer para que las pequeñas y medianas fábricas de software del AMBA pudieran implementarlos?

2.2 Objetivos

A partir de la hipótesis, se presenta como objetivo general “definir e implementar un modelo de gestión del conocimiento para las pequeñas y medianas fábricas de software en el AMBA”. Los específicos son:

¹ adri.maulini@gmail.com

² lstraccia@frba.utn.edu.ar

³ flopollo@gmail.com

1. Identificar y comparar modelos de gestión del conocimiento vigentes en el mundo.
2. Identificar los requisitos necesarios, propios de las organizaciones, para la implementación de dichos modelos.
3. Analizar las características de las pequeñas y medianas fábricas de software en el AMBA.
4. Determinar las necesidades asociadas a la gestión de conocimientos que poseen las pequeñas y medianas fábricas de software en el AMBA.
5. Proponer un modelo de gestión del conocimiento para las pequeñas y medianas fábricas de software en AMBA.
6. Implementar el modelo de gestión del conocimiento en diversas organizaciones y analizar sus resultados.

2.3 Metodología

Se busca realizar una aproximación al tema a través de un estudio de tipo exploratorio y descriptivo. Se busca obtener una primera aproximación al tema y conocerlo en particular a través de su examen y caracterización, analizando casos y poniendo énfasis en su comprensión y, en la medida de lo posible, en temas más amplios que lo rodean [6]. Se utiliza un abordaje cualitativo ya que se busca examinar la naturaleza general de los fenómenos y contribuir a identificar los factores importantes que pueden ser medidos [7].

Los objetivos 1 y 2 se buscan cumplir a través de una investigación documental "con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos divulgados por (diversos) medios" [8]. Para los objetivos 3 y 4 se utilizan tres fuentes fundamentales: observaciones del ambiente, bitácora y recolección enfocada. Específicamente para la caracterización de las pequeñas y medianas fábricas de software y la identificación de problemas asociados a la implementación de modelos de gestión del conocimiento se llevan adelante cuestionarios mixtos (considerando tanto preguntas abiertas como cerradas) y entrevistas semiestructuradas. Se incluye también la observación participante y el análisis documental.

Se trabaja sobre una población seleccionada de empresas a través de un muestreo. Como afirma Hernández [5] "lo que se busca en la indagación cualitativa es profundidad. Por lo tanto, se pretende calidad en la muestra, más que cantidad". Mertens [9] señala que en el muestreo cualitativo se comienza con la identificación de ambientes propicios, para luego identificar grupos e individuos (si la unidad de análisis implicara individuos). Tal como se justificó anteriormente la primera decisión respecto a la muestra está asociada a la definición de un alcance que incluye pequeñas y medianas fábricas de software del Área Metropolitana de Buenos Aires. Respecto del tipo de muestreo a realizar y basado en la clasificación brindada por [10-13] se utilizará una muestra diversa o de máxima variación, "documentando diversidad para localizar diferencias y coincidencias, patrones y particularidades" [5].

Finalmente, en la propuesta del modelo se utiliza el prototipado evolutivo experimental [14], [15] consiste en desarrollar una solución inicial para un determinado problema, generando su refinamiento de manera evolutiva por prueba de aplicación de dicha solución a casos de estudio (problemáticas) de complejidad creciente. El proceso de refinamiento concluye al estabilizarse el prototipo en evolución.

3. GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO

3.1 Conocimiento

Existen diferentes perspectivas o campos epistemológicos para definir el término "conocimiento". Díaz y Millán [17] lo definen como "la mezcla de creencias cognitivas y contextualizadas, perspectivas, juicios, metodologías, información, experiencias y expectativas hechas sobre un objeto, que se adaptan y potencializan por la mente de un individuo (conocedor)". También se puede definir como "cualquier sentencia, procedimiento u objeto que puede ser propiedad (patente, publicación) y convertirse en un recurso económico, o una mercancía en el mercado" [18]. Por lo tanto, según esta definición, el conocimiento presente en una organización puede traducirse como valor económico, lo cual pone de manifiesto su relevancia para las organizaciones.

El conocimiento se puede clasificar como tácito o explícito, definiendo al tácito como aquel que es difícil de expresar, formalizar y compartir, muy personal y subjetivo, derivado de la experiencia, y al conocimiento explícito como es aquel que se puede expresar y formalizar fácilmente, por lo cual, se adquiere mediante métodos formales de estudio. Ambos tipos están presentes en una organización, y tienen igual de importancia para la misma [19]. También se puede clasificar al conocimiento en: público (se encuentra disponible de forma fácil para cualquier persona), compartido (conocimiento comunicado a través del lenguaje y representaciones) o personal (es el conocimiento tácito que está en una persona) [20].

3.2 Gestión del conocimiento

Como se mencionó anteriormente el conocimiento es de vital importancia para las organizaciones, es por esto que es necesario administrarlo de forma correcta y allí surge el término "Gestión del conocimiento" (GC) que puede definirse

como “un enfoque gerencial o disciplina emergente que busca de manera estructurada y sistemática aprovechar el conocimiento generado para alcanzar los objetivos de la organización y optimizar el proceso de toma de decisiones” [16].

Según Díaz y Millán [17], las organizaciones se preocupan cada vez más por mantener el talento inmerso en sus empresas, por ende, la Gestión del Conocimiento (GC) y el Capital Intelectual (CI) se convierten en ventajas competitivas para las organizaciones modernas. Rueda Martínez [21] indica que no existe un consenso definitivo respecto del término GC y que la mayoría de las definiciones académicas se pueden clasificar en tres grupos: la GC entendida como explotación de un recurso a disposición de la organización, aquella con una perspectiva humana-productiva y la conceptualizada en base a una descripción del proceso de producción y aplicación del conocimiento.

3.3 Modelos de Gestión del Conocimiento

Existen diversos modelos de gestión del conocimiento, que proponen diferentes procesos, herramientas, alcances, y que son presentados a continuación:

- Modelo de Wigg [20]: Wiig es uno de los principales precursores de la GC, y en el año 1993 propone un modelo que consta de cuatro etapas principales relacionadas al conocimiento: construir, retener, agrupar y utilizar. Cada una de las etapas contiene a su vez sub etapas y actividades bien definidas.
- Modelo de Nonaka y Takeuchi [19]: su modelo radica en la importancia de convertir el conocimiento implícito en conocimiento explícito. Para convertir el conocimiento de implícito a explícito, se siguen 4 fases principales, en un modelo permanente en espiral. Este modelo se centra en lo personal, grupal, organizacional e inter-organizacional.
- Sveiby [22]: en este modelo, los integrantes de la organización son tomados como principales actores. Se basa en la transferencia de conocimiento entre 9 aspectos de la organización y para cada aspecto existe una pregunta estratégica que debe ser respondida.
- Modelo de Earl [23]: propone un modelo de GC dividido en lo que él llama “escuelas de gestión del conocimiento”. Cada escuela del modelo de Earl tiene una filosofía y ésta indica hacia donde se orienta la escuela, es decir, qué es lo que se busca al aplicarla.
- Kerschberg [24]: propone un modelo para gestionar el conocimiento, teniendo en cuenta que el mismo puede provenir de fuentes heterogéneas. Este modelo está basado principalmente en aspectos tecnológicos y el uso de capas de presentación, procesamiento y datos.
- Bustelo y Amarilla [25] proponen un modelo de GC enfocado principalmente en la gestión de la información, haciendo énfasis en el hecho de que sin una adecuada gestión de la información no puede existir la GC. Para ellos, el centro de la gestión de la información es, a su vez, la gestión de la documentación (información que queda plasmada en documentos).
- CEN (Comité Europeo de Estandarización) [26]: publica un modelo de GC llamado “Guía de buenas prácticas en gestión del conocimiento”. A pesar de ser llamado guía de buenas prácticas, por su estructura se puede considerar como un modelo. Este es uno de los modelos más utilizados actualmente [27]. Consta de tres capas principales: foco de negocios, actividades centrales, facilitadores.
- Bovea y García [28]: toma como base la teoría de la complejidad, y lo aplica a lo que los autores consideran como un modelo complejo: el desarrollo de fábricas de software. Este modelo propone etapas para el desarrollo de software y trata de explicar cómo debería fluir el conocimiento en cada una de estas etapas. No parece ser directamente un modelo de GC sino un modelo de funcionamiento de una fábrica de software, en donde se toman en cuenta los flujos de conocimiento. Las etapas que plantea el modelo son iterativas, es decir, se pueden repetir para adecuarse a la reutilización de paquetes de software y por ende del conocimiento.
- Mc Elroy [29]: el modelo incluye dos actividades principales: la producción del conocimiento y la integración del mismo. La primera implica todas aquellas actividades necesarias para crear nuevo conocimiento. La segunda, aquellas actividades necesarias para integrar el conocimiento nuevo a las bases de conocimiento existentes en la organización.
- ISECO [30]: este modelo de GC fue creado para mejorar el desarrollo de equipos de proyectos informáticos. Las etapas que define este modelo se implementan de manera cíclica y son: interiorización, socialización, exteriorización, combinación y control.

3.4 La Gestión del Conocimiento en las pequeñas y medianas fábricas de software

El término Software Factory (SF) o fábrica de software no tiene una definición clara o consistente; emerge por primera vez entre los años 60 y 70, en Estados Unidos y Japón, pero no es sino hasta los años 90, en donde se comienza a dar forma a este concepto [31]. Con base en conceptos y caracterizaciones referentes a las fábricas de software (Software Factory, SF) de autores como Nomura y otros [32], Santos y Soares [33], Fernstrom y Narfelt [34] y Greenfield y Short

[35], se puede inferir que una SF es un modelo de referencia, plantilla o forma de trabajo, que se puede aplicar en empresas que desarrollan productos de software, basado en equipos de trabajo multidisciplinarios, conformados por profesionales especializados, con roles y responsabilidades claras, que siguen procesos bien definidos, para producir una familia de productos de software. Rus y Lindvall [36] detallan problemas o desafíos que presenta la Gestión del Conocimiento en la industria del software:

- La tecnología cambia constantemente y todos los días se produce conocimiento nuevo, además es necesario buscarlo fuera de los límites de la organización.
- Cada proyecto de software es diferente, tiene un contexto diferente y los procesos pueden variar de un proyecto a otro y las personas involucradas en el desarrollo de software a menudo están expuestas a esta diversidad.
- El desarrollo de software no sólo necesita conocimiento sobre su propio dominio, sino sobre el dominio para el cual se realizan los productos, por lo cual adquirir la experiencia y el conocimiento necesario para cada proyecto toma un tiempo largo.
- Los desarrolladores de software necesitan tener conocimiento muy específico acerca de las convenciones locales de desarrollo, este conocimiento se maneja como un "folklore" de manera informal.
- Dentro de una organización de desarrollo de software, es necesario saber "quién sabe qué cosa", esto reduce los tiempos necesarios para buscar expertos que ayuden en alguna tarea. Además, ayuda a los empleados a conocer la importancia de sus conocimientos.
- El desarrollo de software de gran tamaño es una actividad grupal y la división del trabajo en fases significa a menudo que varios grupos se involucran en el proceso de desarrollo; además con la globalización es posible que estos grupos diversos estén en locaciones geográficas y zonas horarias diferentes.
- El conocimiento en la industria del software es mayormente implícito, y no se vuelve explícito en primera instancia por la falta de tiempo.
- El conocimiento es altamente especializado, por lo cual es difícil de formalizar.

Así mismo, la alta rotación de personal en el rubro ocasiona que el conocimiento sea más volátil [1]. Además, las posibilidades de que los proyectos fracasen o se cancelen son elevadas, por lo cual se debe registrar también qué cosas no se deben hacer para que el proyecto tenga éxito [1]. Sumado a todo esto, dentro de la Ingeniería de Software existen proyectos globales, con grupos divididos en locaciones geográficas diferentes y "las distancias temporales y geográficas afectan en primera instancia la habilidad para compartir y acceder al conocimiento, mientras que las distancias socioculturales introducen desafíos para unificar las formas en que el conocimiento se comparte y mantiene" [37].

Las fábricas de software que pertenecen a la categoría de pequeñas y medianas empresas además incorporan las problemáticas asociadas a este tipo de organizaciones [4], tales como dificultades en la identificación y acceso a la tecnología adecuada, limitaciones técnicas y competitivas que imponen las escalas de producción, deficiente infraestructura física, falta de asociatividad empresarial, carencia de directivos con capacidad gerencial y pensamiento estratégico y, dificultad de cimentar la articulación del sector con la gran empresa y con los sistemas de compras estatales [38 en 39]. Di Ciano afirma además que "las Pymes [N. de A.: Pequeñas y Medianas Empresas] en su mayoría son altamente volátiles, con altas tasas de nacimientos e inestabilidad, dado que las empresas nacen pequeñas (son pocas las firmas que nacen con gran volumen) y los decesos se producen generalmente en los primeros años de vida", tienen insuficiente delegación y mala distribución de tareas, vaga definición de dos aspectos fundamentales para toda organización: la misión y la visión y presentan falta de formación de los gerentes [40].

4. PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO

4.1 Generalidades

Este modelo se basa en parte en los modelos de Earl, Mc. Elroy, ISECO y CEN, analizados y explicados anteriormente. Está diseñado para ser aplicado en SF o en áreas internas de empresas que funcionen de manera similar a una SF y ha sido creado teniendo en cuenta todos los desafíos que presenta la GC en este rubro. Se considera importante que el modelo sea compatible tanto con metodologías que derivan del manifiesto ágil (ya que la idea es interferir lo menos posible el proceso de desarrollo y las reuniones que proponen podrían ser una extensión de las ceremonias propuestas en este tipo de metodologías), como con metodologías tradicionales.

La idea principal de este modelo (y esto deriva del modelo de Mc. Elroy) es buscar espacios con carencia de conocimientos para crear conocimiento sólido a partir de este vacío, acompañando el trabajo diario y de forma iterativa. De esta manera, se puede adaptar a los tiempos reducidos que se presentan en las fábricas de software. Al igual que el modelo de Mc. Elroy, el modelo propuesto comienza con la detección de una necesidad de conocimiento y termina con el conocimiento formalizado en la base de conocimientos e interiorizado en otros miembros de la

organización (esto reduce la volatilidad del conocimiento que podría producir la alta rotación de personal). Se consideran como base de conocimientos aquellos medios internos de los cuales se puede obtener conocimiento, como lo son la wiki de conocimientos, correos electrónicos, intranet o web interna y documentos internos. Esta base de conocimientos es similar a la presentada en el modelo de Kerschberg. A diferencia de otros modelos como el modelo CEN, este modelo propone que el conocimiento sea compartido (al menos con el mismo equipo de trabajo) de forma verbal, antes de formalizarlo. De esta manera el conocimiento puede ser validado por los demás miembros del equipo, ampliado y mejorado antes de ser llevado a la base de conocimientos.

4.2 Estructura del modelo

El modelo que se propone (Figura 1) posee seis etapas principales, cíclicas y continuas: detección de la necesidad de conocimiento, búsqueda de conocimiento, organización e interiorización, utilización, compartición y validación, y formalización. Es un proceso iterativo y paralelo al proceso de desarrollo de software, sin intervenir de forma agresiva en el mismo. Existen además dos etapas paralelas a las mencionadas anteriormente que no son iterativas: una primera etapa que implica preparar a la organización para la aplicación del modelo y una etapa transversal y de ejecución continua que implica el mantenimiento del modelo. Estas etapas deben ser adaptadas al ciclo de desarrollo de la organización, es decir, la duración de cada ciclo depende de cómo se organice el equipo de trabajo, y debe ser definido en la etapa previa a la implementación del modelo.

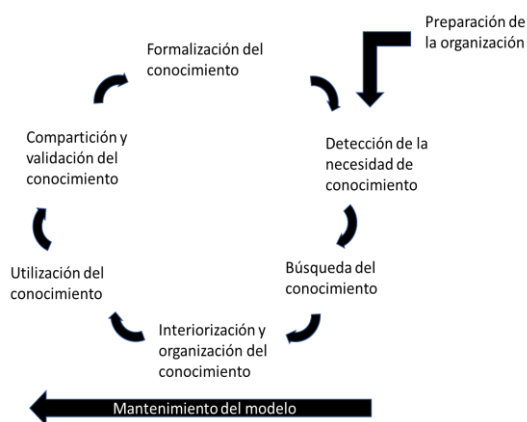


Figura 1. Modelo propuesto

4.3 Elementos necesarios para la implementación del modelo

Durante la fase de preparación del modelo se determinan las características de dos herramientas muy importantes que debe incluir la aplicación del modelo: la base de conocimientos y el directorio. Estas herramientas deben ser definidas por la organización para adaptarse a las necesidades de esta, sin embargo, se recomienda que cumplan con los siguientes lineamientos:

4.3.1 Características de la base de conocimientos

En este modelo se considera como base de conocimientos a aquellos medios internos de los cuales se puede obtener conocimiento, como lo son: la wiki de conocimientos, correos electrónicos, intranet o web interna y documentos internos. Esta base de conocimientos es similar a la presentada en el modelo de Kerschberg y se representa en la Figura 2.

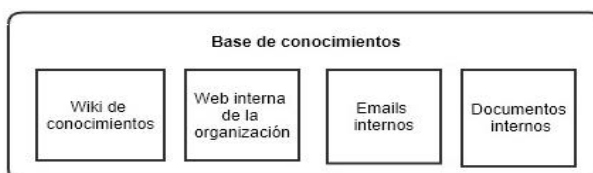


Figura 2. Base de conocimientos

La wiki de conocimientos es un sistema interno (web, aplicación de escritorio o aplicación móvil), en donde se centralizará en conocimiento que va siendo formalizado, en forma de artículos o tutoriales. Puede formar parte de la web interna de la organización. Para que algunos de los desafíos planteados anteriormente en esta investigación sean resueltos por este modelo, es muy importante la wiki de conocimientos y se sugiere que tenga ciertas características que se presentan a continuación (sin embargo, no es necesario que las características sean idénticas a las sugeridas, no es un limitante, ya que depende de los recursos que estén a disposición de la organización):

- Debe haber un espacio para cada proyecto, accesible al menos a los líderes de proyectos, en donde se detallan características propias del mismo, contexto, problemas importantes que se hayan presentado a lo largo de su duración y la forma en que fueron resueltos. De igual manera, al final del proyecto se debe colocar un apartado con recomendaciones para otros equipos y si el proyecto fue fallido, se deben indicar las posibles causas y cosas que no se deben hacer. Se puede determinar qué información estará visible para la organización según sus necesidades.
- Cada entrada en la wiki de conocimientos (cada artículo o pieza de conocimiento agregada) debe contener palabras claves que facilitarán la búsqueda, así mismo contener lo siguiente: autor o autores, proyecto y fecha, tecnología(s), fuente (bien sea interna o externa).
- Se recomienda la utilización de etiquetas para cada artículo, de forma de clasificar de mejor manera la información. Por ejemplo, si es información sobre “Mejores Prácticas” se puede utilizar una etiqueta similar a #MejoresPrácticas, si la tecnología es un artículo sobre programación en C++ se puede utilizar una etiqueta como #c++ y así sucesivamente, esto va a ayudar a separar de mejor manera la información y facilitará su búsqueda.
- Se recomienda que los filtros de búsqueda sean al menos por texto, por autor, por proyecto, y por etiqueta.
- Se recomienda mostrar en la página de inicio los títulos de los últimos artículos agregados con su respectivo enlace.
- Se recomienda colocar al final de cada artículo una lista de otros artículos creados por el mismo autor y artículos con etiquetas similares.
- Una vez que un artículo es creado no estará inmediatamente visible, debe ser revisado y aceptado por el líder del proyecto primero.
- Se recomienda que la wiki de conocimientos esté vinculada con el directorio, es decir, en algún lugar del artículo debe haber un link que lleve al perfil del autor en el directorio.

4.3.2 Características del directorio

El directorio es otra herramienta que puede facilitar el proceso de compartir conocimiento dentro de la organización. Un directorio contiene información básica de todos los miembros de la organización y puede permitir que un miembro de la misma consiga a otros que tengan información relacionada con sus dudas y pueda contactarlos para solventarlas. Se recomienda que el directorio sea un medio electrónico, por ejemplo, parte de la web interna de la organización. Se recomiendan las siguientes características para el directorio:

- La utilización de etiquetas en el directorio que reflejen el conocimiento de cada persona, esta información puede ser actualizada periódicamente por cada uno.
- Debe contener información básica de cada miembro de la organización: Sus conocimientos relacionados con la organización y su trabajo diario, su rol actual, proyectos en los que ha estado involucrado, información para contactarlo y una lista de los artículos que ha creado para la base de conocimientos con sus respectivos enlaces.
- Cuando una persona realiza una búsqueda en la base de conocimientos, debe aparecer un listado de las personas que podrían saber del tema.
- Se deben poder realizar búsquedas en el directorio, por etiquetas, proyectos o datos de las personas.
- Tanto la wiki de conocimientos como el directorio deben estar accesibles para miembros de la organización en todas las locaciones geográficas donde la misma opere, de esta manera y ubicando las reuniones relacionadas con la aplicación de este modelo en horarios donde todos los miembros del equipo estén disponibles (al igual que se suele hacer cuando se aplica Scrum en proyectos distribuidos), se hace factible su aplicación en equipos globalmente distribuidos.
- Es entendible que algunas organizaciones no lleven control de los proyectos en que participa cada persona o un historial de este tipo de información, por lo que las características del directorio son recomendaciones, sin embargo, para que funcione adecuadamente, el directorio debe contener como mínimo el rol y tecnologías en las cuáles trabaja y ha trabajado cada miembro.
- De no existir un directorio y no haber posibilidades de conseguirlo, se recomienda entonces para sustituirlo, listas de email organizadas a las que pertenezcan los miembros de la organización, a las cuales la persona que tiene una necesidad de conocimiento pueda enviar un email preguntando por el mismo.

4.4 Preparación de la organización para la aplicación del modelo

4.4.1 Objetivo

Durante esta fase se designa el Comité de Gestión de Conocimiento de la organización, se determina qué elementos conforman la base de conocimientos y se busca ponerlos a disposición de todos los miembros de la organización y se diseña y crea la base de conocimiento.

4.4.2 Actividades

- Seleccionar el Comité de Gestión del conocimiento: la organización debe seleccionar a una o más personas (dependiendo de las necesidades de cada caso) para integrar este Comité, cuyas funciones son supervisar la adecuada aplicación del modelo en cada uno de los proyectos, llevar control de las charlas informativas (cronograma y temas) así como también evaluar las solicitudes de estas, garantizar el espacio y materiales necesarios para que se lleven a cabo las charlas informativas, tomar cualquier decisión pertinente a adaptar el presente modelo a la organización, capacitar a los miembros de la organización en cuanto a la aplicación del presente modelo, velar por el correcto funcionamiento de la wiki de conocimientos y el directorio, solventar cualquier duda o problema que tenga algún equipo en relación con la gestión del conocimiento, gestionar cualquier motivación que decida otorgar la organización a los empleados que generen más conocimiento.
- Determinar qué elementos pertenecen a la base de conocimientos y garantizar una forma en la que los miembros de la organización tengan acceso a este material.
- Crear o adquirir los elementos pertenecientes a la base de conocimiento.
- Capacitar a los equipos existentes en cuanto a la aplicación del modelo.



Figura 3. Actividades de la etapa de preparación de la organización

Durante la fase de preparación, cada equipo establece cuándo van a realizarse las reuniones periódicas para compartir y validar el conocimiento.

4.5 Detección de la necesidad de conocimiento

4.5.1 Objetivo

Esta etapa inicia el ciclo del modelo y se da cuando una persona del equipo (en adelante, el interesado) detecta que existe una necesidad de conocimiento importante que puede ser un bloqueo para realizar su trabajo o para el trabajo de otros compañeros del equipo. Se puede afirmar que a partir de esta etapa el modelo propuesto presenta similitudes con los procesos de mejora continua dentro de la gestión de calidad en las organizaciones. Esta etapa fue tomada de la primera actividad del modelo de Mc. Elroy [28], como disparador del ciclo de gestión del conocimiento.

Bhuiyan y Amit [41] definen al proceso de mejora continua como una cultura de mejora sostenida que apunta a la eliminación del desperdicio en todos los sistemas y procesos de una organización. Involucra el trabajo de todos los miembros de la organización para hacer mejoras sin necesidad de grandes inversiones de capital. Se puede observar a lo largo de este modelo, que la suma de conocimiento a la organización mediante la detección de una necesidad de este, de forma cíclica, es similar a lo que el proceso de mejora continua supone.

4.5.2 Actividades

- Detectar necesidad: es el momento en el que un miembro de un proyecto se da cuenta de que necesita utilizar un conocimiento que no posee.
- Realizar preguntas para determinar importancia.
- Notificar al líder de equipo para ser incorporado en la lista de temas a discutir en la siguiente reunión periódica para compartir y validar el conocimiento.

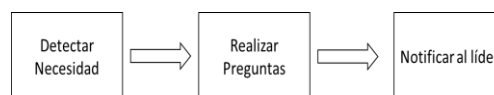


Figura 4. Actividades de la etapa "Detección de la necesidad de conocimiento"

Respecto de la segunda actividad, para determinar si realmente existe una necesidad de conocimiento el miembro del equipo debe responderse las siguientes preguntas: ¿es esta necesidad de conocimiento un bloqueo para terminar mis tareas? ¿Puede ser esta necesidad de conocimiento un bloqueo para que otro miembro de mi equipo o de otro equipo termine sus tareas? ¿Puede surgir esta misma necesidad de conocimiento en un futuro, bien sea por alguien en mi equipo o por otra persona de la organización? ¿Adquirir este conocimiento puede ayudar a mejorar la calidad y legibilidad del resultado esperado por el equipo y el cliente? Si la respuesta a alguna de estas preguntas es SI, entonces es una señal de que se debe seguir con las siguientes etapas. Si la respuesta es No a las cuatro preguntas la persona debe replantearse la importancia de esta necesidad de conocimiento para evitar perder tiempo y enfocarse en la resolución de sus tareas. Responder la cuarta pregunta es necesario para determinar la necesidad de conocimiento

de convenciones locales de desarrollo de software dentro del equipo. Es importante acotar también que, si un líder de proyecto detecta errores comunes y repetitivos en el proceso de desarrollo de software, esto también puede ser un detonante para generar conocimiento, ya que claramente, a pesar de que esta persona cuente con el mismo, el resto del equipo necesita tener a mano esta información en pro de lograr los objetivos con los estándares de calidad.

4.6 Búsqueda del conocimiento

4.6.1 Objetivo

El interesado debe recurrir a las fuentes internas de conocimiento pertenecientes a la organización para buscar el conocimiento necesitado; si no lo consigue de esta manera, entonces debe recurrir a fuentes externas. Con este modelo se sugiere que el conocimiento sea buscado en fuentes internas en primera instancia, no solo para ahorrar tiempo sino también para reutilizar el conocimiento ya generado en la organización.

4.6.2 Actividades

- Buscar el conocimiento en la wiki de conocimientos: Si el conocimiento fue encontrado en la wiki de conocimientos (descrita más adelante), y fue de utilidad entonces no se llevan a cabo las últimas dos fases del modelo, ya el conocimiento está formalizado. Si no fue encontrado o no se encontró nada útil se debe continuar con la siguiente actividad de esta fase.
- Buscar el conocimiento en el directorio: Si no se consiguió nada útil en la wiki de conocimientos, se debe buscar una persona con conocimientos del tema en el directorio. Si el conocimiento fue encontrado utilizando el directorio (es decir, en otra persona de la organización), pero no está formalizado, se debe considerar entre ambos la importancia de formalizar este conocimiento respondiendo las mismas preguntas de la etapa anterior. Si es importante formalizarlo entonces se debe saltar a con la actividad e de este modelo, si no es importante, no se llevan a cabo las dos últimas fases del modelo.
- Buscar el conocimiento en otras fuentes internas de la base de conocimientos: si el conocimiento aún no ha sido encontrado en las actividades anteriores, se debe buscar en otro tipo de fuentes internas, como, por ejemplo: algún repositorio de documentos. Si se consigue la información, la persona debe preguntarse si es importante que esta información esté en la wiki de conocimientos y de ser así, saltar a la actividad.
- Buscar el conocimiento en fuentes externas: Si el conocimiento aún no ha sido encontrado, es necesario entonces buscar en fuentes externas. Si el conocimiento fue encontrado en una fuente externa a la organización, el empleado debe utilizar su criterio para determinar la importancia de formalizar este conocimiento dentro de la organización. Es decir, debe preguntarse: ¿Es este conocimiento difícil de encontrar en una fuente externa?, ¿Es importante realmente que la organización cuente con este conocimiento en la wiki de conocimientos?, ¿Cuándo otra persona tenga la misma necesidad de conocimiento, la puede resolver más rápido consultando fuentes internas? Si la respuesta a alguna de estas preguntas es SI, entonces se debe continuar con la siguiente actividad de esta fase, si la respuesta a todas las preguntas es NO, entonces no se continúa con las demás fases del modelo.
- Comunicar novedades al líder del proyecto: Si se determina que es necesario formalizar el conocimiento encontrado, entonces la persona debe enviar un email al líder del equipo para que este conocimiento sea considerado en las siguientes fases del modelo para el período actual, es decir, sea agregado a la lista de temas a compartir y evaluar en la reunión periódica de GC. Una vez que el líder del equipo recibe dicho email, si considera que es relevante según su criterio, debe agregarlo a la lista antes mencionada.

El orden de estas actividades es sugerido, pero no determinante y queda a criterio del miembro del equipo en qué fuentes realizar su búsqueda primero para conseguir el conocimiento, pero se continúa siempre y cuando el mismo no esté formalizado y sea importante hacerlo.

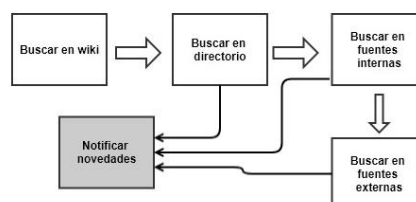


Figura 5. Actividades de la etapa "Búsqueda del conocimiento"

4.7 Interiorización y organización del conocimiento

4.7.1 Objetivo

El interesado debe, una vez encontrado el conocimiento, organizar la información adquirida e interiorizarla. Si el conocimiento no está formalizado en la base de conocimiento y tiene dudas de que este nuevo conocimiento esté

correcto en primera instancia antes de continuar con su trabajo, debe consultarlo con líderes y otros miembros de la organización (validación en primera instancia). Esta etapa puede ser comparada con la etapa de Interiorización del modelo ISECO.

4.7.2 Actividades

- Consultar con líderes: en caso de que existan dudas sobre la veracidad de la información encontrada, la persona debe consultar con sus líderes más directos, los cuales, aunque no posean conocimiento del tema pueden validar las fuentes de donde fue adquirido. Si no existen dudas se debe saltar directamente a la siguiente actividad.
- Organizar la información encontrada: la persona debe organizar la información encontrada de modo que sea lo más fácil posible de interiorizar y convertir en conocimiento.
- Interiorizar la información adquirida: la persona debe interiorizar la información para convertirla en conocimiento que pueda ser utilizado en la siguiente fase, esta actividad puede realizarse en forma simultánea a la anterior. Se recomienda conversar sobre el tema encontrado con otro miembro del equipo para facilitar el proceso de interiorización.



Figura 6. Actividades de la etapa "Interiorizar el conocimiento"

4.8 Utilización del conocimiento

4.8.1 Objetivo

Durante esta etapa el conocimiento es utilizado al mismo tiempo que se realizan las tareas habituales del equipo de trabajo, se deben tomar notas de la aplicación de los puntos más importantes aprendidos, lo cual ayudará a ejecutar las siguientes fases de este modelo. Esta etapa se puede considerar una extensión de la etapa de interiorización del modelo ISECO, ya que la persona debe tomar registro de su experiencia utilizando este conocimiento para darle forma al mismo y tenerlo en cuenta a la hora de compartir y externalizar el conocimiento. Es importante observar que esta etapa de utilización antecede a su validación. En este aspecto reside una de las características fundamentales de este modelo, donde el interesado resulta el primer validador del valor de dicho conocimiento.

4.8.2 Actividades

- Utilizar: es la utilización del conocimiento como tal en las tareas diarias según el rol que tenga el individuo.
- Registrar: la persona debe tomar registro de cómo fue la experiencia de aplicar el conocimiento encontrado, para que al incluir esto en la etapa de formalización, éste resulte más útil para las personas que lo necesiten en un futuro.

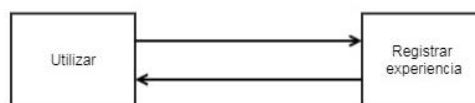


Figura 7. Actividades de la etapa "Utilizar el conocimiento"

4.9 Compartición y validación

4.9.1 Objetivo

Según [42] las metodologías ágiles para el desarrollo de software han sido implementadas para disminuir el tiempo de desarrollo a través de un modelo iterativo e incremental, en negocios donde los requerimientos son relativamente inestables, es decir que pueden cambiar sobre la marcha. Estas metodologías han sido desarrolladas además para incrementar la satisfacción del cliente, reducir la cantidad de errores y reflejar en el resultado final las necesidades de cambio en la organización que ocurren durante el desarrollo del producto. En [43] se afirma que las metodologías ágiles promueven las relaciones y comunicación entre los miembros de un equipo de desarrollo de software, generando relaciones cercanas, espíritu de equipo y buen ambiente de trabajo, además de promover la cooperación entre el equipo y el cliente. Este tipo de relaciones y espíritu de equipo puede ayudar a facilitar el proceso de GC.

Es entonces durante esta etapa donde ocurre la mayor vinculación entre el modelo propuesto y las metodologías que siguen el manifiesto ágil. Sin embargo, que se utilice una metodología ágil no es un determinante para la aplicación de

este modelo, es compatible también con metodologías tradicionales. Esta etapa busca que en una ceremonia periódica de las metodologías ágiles (por ejemplo, la reunión retrospectiva de Scrum), cada miembro del equipo comparta con los demás el conocimiento adquirido y utilizado durante el ciclo de la metodología. Se recomienda la reunión retrospectiva (si se usa Scrum), ya que su propósito es hablar de lo que se debe mejorar y de lo aprendido, sin embargo, se puede sumar esta fase a cualquier ceremonia o reunión de una metodología ágil, a criterio de la organización [4]. Si no se utilizan metodologías ágiles, se debe entonces establecer una reunión periódica (no más de un mes de diferencia entre ellas, para evitar que se pierda el conocimiento adquirido) para realizar esta actividad.

En esta reunión (bien sea una al final de una ceremonia ágil o no), cada miembro del equipo que haya contribuido a la generación de conocimiento comparte lo aprendido y describe la forma en que se utilizó. Los demás miembros del equipo pueden intervenir para darle forma al conocimiento y añadir ideas de ser necesario. Así mismo, se valida definitivamente este conocimiento entre todos los miembros del equipo y se determina la importancia de formalizarlo. En esta etapa el conocimiento es compartido mediante socialización entre los miembros del equipo. Se debe también durante esta reunión planificar la forma en que cada nuevo conocimiento será formalizado en la wiki de conocimientos, aportando ideas para facilitar y agilizar el proceso.

4.9.2 Actividades

- Explicar el tema: la persona que buscó y utilizó el conocimiento debe compartir el mismo con el equipo de forma breve, debe también justificar el por qué sería útil formalizar el mismo.
- Enriquecer con opiniones del resto del equipo: el resto del equipo debe opinar si le parece que el conocimiento adquirido es válido y agregar posibles cambios o añadidos a lo compartido.
- Realizar la votación de formalización: los miembros del equipo presentes en la reunión votarán si le parece relevante o útil que este conocimiento sea agregado a la wiki de conocimientos. En caso de empate, decide el líder del equipo.
- Definir la pertinencia de charla informativa: entre los miembros del equipo se procede a decidir si el tema es de tal importancia que amerite una charla informativa para el resto de la organización u otros equipos, esta decisión corresponde al líder del equipo, los demás miembros opinarán al respecto. Sin embargo, que el líder decida no es algo restrictivo, se puede decidir de acuerdo con las necesidades de cada equipo.

Si se decide hacer la charla informativa, el líder de equipo debe solicitar formalmente un espacio para la charla al Comité de gestión del conocimiento. La decisión del Comité acerca de la realización de la charla solicitada debe ser comunicada posteriormente a equipo con tiempo suficiente para su preparación. Es necesario llevar una minuta de cada para que quede registro de esta y de las acciones a seguir.

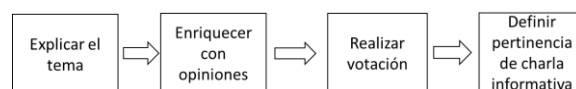


Figura 8. Actividades de la etapa “Compartir y validar el conocimiento”

Para llevar un orden en cuanto a la secuencia de charlas informativas dentro de la organización, se recomienda que el Comité de gestión del conocimiento lleve un calendario de charlas informativas. En este punto es importante aclarar que este modelo no restringe la forma en que se compartan todos los documentos propuestos, puede ser desde medios impresos, hasta correos electrónicos o una sección especial en la wiki de conocimientos. Por motivos ambientalistas se recomienda 100% la utilización en lo posible de medios digitales en vez de métodos impresos.

4.10 Formalización

4.10.1 Objetivos

Una vez compartido y validado el conocimiento por los miembros del equipo, el conocimiento debe ser formalizado, es decir, llevado a las bases de conocimiento. Luego de formalizarse el conocimiento, si éste es de suma importancia para el resto de la organización, se pueden organizar charlas que involucren a otros equipos (por ejemplo: charlas técnicas). Debe existir también un calendario disponible para todos los miembros de la organización con los detalles de cada una de las charlas planificadas, este calendario se debe actualizar cada vez que se planifica una nueva charla informativa.

4.10.2 Actividades

- Formalizar el conocimiento: es volcar todo el conocimiento adquirido en la base de conocimientos, de forma ordenada y fácil de comprender para el resto de la organización.

- Actualizar el directorio: si la organización cuenta con un directorio con las características señaladas en este capítulo, entonces el líder de proyecto debe actualizar el perfil de la persona para indicar que posee ahora conocimiento sobre el tema. Se puede también notificar por email a los miembros de la organización de que existe un nuevo artículo en la wiki de conocimientos.
- Solicitar charla informativa: si se decidió en la fase anterior solicitar una charla informativa para el tema en cuestión, se debe enviar la solicitud al Comité de gestión de conocimiento.

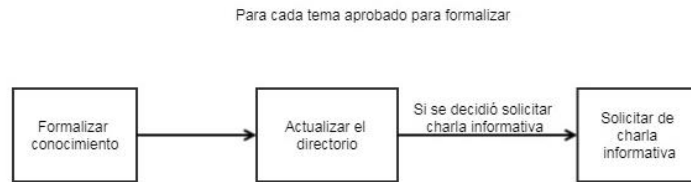


Figura 9. Actividades de la etapa “Formalizar el conocimiento”

4.11 Mantenimiento del modelo

4.11.1 Objetivo

La organización debe llevar un mantenimiento y control periódico para que su aplicación pueda ser prolongada en el tiempo y sea posible ir adaptando de a poco el modelo a la organización y mejorarlo de forma continua.

4.11.2 Actividades

- Resguardar la wiki de conocimientos y el directorio: debe realizarse una copia de seguridad periódica de la información almacenada en la wiki de conocimientos y el directorio, la periodicidad de esta actividad y las personas involucradas dependerá de las políticas de back-up de la organización.
- Solicitar retroalimentación e implementación de mejoras: se recomienda que la lleve a cabo el Comité de Gestión de Conocimiento designado por la organización y consiste en solicitar retroalimentación periódicamente a los miembros de la organización relacionado con el proceso de GC, para determinar qué aspectos hay que reforzar o modificar y hacer que el modelo se adecúe cada vez más a las necesidades de la organización.
- Reconocer a los generadores de conocimiento: se recomienda que la aplicación del modelo sea incentivada con premios o reconocimientos a las personas que más artículos suban a la wiki de conocimientos en un período de tiempo determinado por la organización, el tipo de reconocimiento y periodicidad de este deben ser definidos previamente.

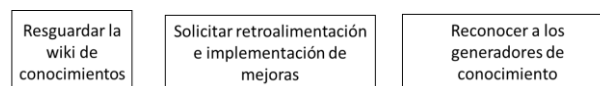


Figura 10. Actividades correspondientes al mantenimiento del modelo

5. CONCLUSIONES

El conocimiento es actualmente uno de los activos más importantes para una organización; de saber manejarlo y administrarlo de forma adecuada puede depender el éxito en lograr ventajas competitivas. Es por esto por lo que la gestión del conocimiento ha cobrado tal importancia. Sin embargo, organizaciones pertenecientes al rubro del desarrollo de software, específicamente fábricas de software, se enfrentan a desafíos que hacen que gestionar dicho conocimiento sea un proceso diferente a otros rubros. En este trabajo se analizan los modelos de gestión del conocimiento existentes y se explica por qué no resuelven estos desafíos. Así mismo se propone un modelo cíclico, que interfiera lo menos posible en el proceso de desarrollo de software y permita a este tipo de organización gestionar su conocimiento de forma adecuada, se especifican sus actividades y herramientas necesarias. Actualmente, este modelo se encuentra en la fase de validación mediante la opinión de expertos.

REFERENCIAS

- [1] A. Aurum, R. Jeffery, C. Wohlin, & M. Handzic. *Managing software engineering knowledge*. Springer, 2013.
- [2] J. Motta, H. Morero, & C. Borrastero. (2016). *La política industrial en el sector de software de Argentina durante los años 2000*. Buenos Aires: Universidad de San Andrés, 2016.
- [3] UTN-FRBA. *La gestión del conocimiento en pequeñas y medianas fábricas de software en el área metropolitana de Buenos Aires*. Proyecto de Investigación y Desarrollo Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, 2018.
- [4] A. Maulini, L. Straccia, & M. Pollo. Una aproximación a un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software. En *Conferencia Internacional de Ingeniería I^oNGENIO*. Medellín, Colombia, 2018.

- [5] R. Hernández et al. *Metodología de la investigación*. México: McGraw Hill, 2006.
- [6] G. Alonso. *El estudio de caso simple. Un diseño de investigación cualitativa. Serie Metodología de la Investigación*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2003.
- [7] D. Van Dalen, & W. Meyer. *Manual de técnica de la investigación educacional*. México: Paidós, 1994.
- [8] UPEL. *Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales*. Caracas: Universidad Pedagógica Experimental Libertador, 2005.
- [9] D. Mertens. *Research and evaluation in Education and Psychology: Integrating diversity with quantitative, qualitative, and mixed methods*. Thousand Oaks: Sage, 2005.
- [10] M. Miles, & A. Huberman. *Qualitative data analysis: An expanded sourcebook*. Thousand Oaks: Sage, 1994.
- [11] M. Miles, & A. Huberman. *Tipology of sampling strategies in qualitative inquiry: A source of new methods*. Thousand Oaks: Sage, 1994.
- [12] J. Creswell. *Qualitative inquiry and research designs: Choosing harmony among five traditions*. Thousand Oaks: Sage, 1998.
- [13] J. Creswell. *Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative Research*. Upper Saddle River: Pearson, 2005.
- [14] V. Basili. "The Experimental Paradigm in Software Engineering." *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 706, 1993.
- [15] A. Ko, T. LaToza, & M. Burnett. "A practical guide to controlled experiments of software engineering tools with human participants." *Empirical Software Engineering*, 20(1), 110-141, 2015.
- [16] V. Pérez, & M. Urbáez. *Modelos teóricos de gestión del conocimiento: descriptores, conceptualizaciones y enfoques*. Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento, 2016.
- [17] M. Díaz, & J. Millán. *Gestión del Conocimiento y Capital Intelectual, a través de modelos universitarios*. Económicas CUC, 2013.
- [18] B. Gibbs, E. Hadley, B. Nerlich, W. Pearce, H. Salvadurai, A. Spencer, & J. Tsouvalis. The 2013 Conference Organising Committee, 2013.
- [19] I. Nonaka, & H. Takeuchi. *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford university press, 1995.
- [20] K. Wiig. *Knowledge Management Foundations: Thinking about thinking – How people and organizations create, represent, and use knowledge*. Arlington: Schema, 1993.
- [21] M. Rueda. La gestión del conocimiento y la ciencia de la información: relaciones disciplinares y profesionales. *Tesis Doctoral*, Universidad Carlos III, 2014.
- [22] K. Sveiby. "A knowledge-based theory of the firm to guide in strategy formulation." *Journal of intellectual capital*, 2(4), 344-358, 2001.
- [23] M. Earl. "Knowledge management strategies: Toward a taxonomy." *Journal of management information systems*, 18(1), 215-233, 2001.
- [24] L. Kerschberg. Knowledge management in heterogeneous data warehouse environments. In *International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery*. Springer Berlin, 2001.
- [25] C. Bustelo & R. Amarilla. "Gestión del conocimiento y gestión de la información." *Inforárea* 8(34), 226-230, 2001.
- [26] CEN. *CEN CWA 14924 European Guide to good Practice in Knowledge Management - Part 1 to 5*. Brussels, 2004.
- [27] J. Pawlowski, & M. Bick. "The global knowledge management framework: Towards a theory for knowledge management in globally distributed settings." *Lead. Issues Knowl. Manag.* 2(2), 134-140, 2015.
- [28] T. Bovea, & V. García. Modelo de gestión del conocimiento aplicado a un sistema complejo: Desarrollo de fábricas de software. *Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference*. Colombia, 2011.
- [29] M. McElroy. *The new knowledge management: complexity, learning and sustainable innovation*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2003.
- [30] N. Pons, Y. Pérez, E. Stiven, & L. Quintero. "Diseño de un modelo de Gestión del Conocimiento para mejorar el desarrollo de equipos de proyectos informáticos." *Revista Española de Documentación Científica*, 37(2), 44-54. 2014.
- [31] M. Cusumano. "The software factory: A historical interpretation." *IEEE Software Magazine* 3, 23-30, 1989.
- [32] L. Nomura, M. Spínola, A. Tonini, & O. Hikage. A model for defining software factory processes. In *19th International Conference on Production Research*, 2007.
- [33] S. Santos, & F. Soares. Authentic assessment in software engineering education based on PBL principles: A case study in the telecom market. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Software Engineering*, 2013.
- [34] C. Fernstrom, K. Narfelt, & L. Ohlsson. "Software factory principles, architecture, and experiments." *IEEE Software*, 9(2), 36-44, 1992.
- [35] J. Greenfield, & K. Short. Software factories: Assembling applications with patterns, models, frameworks and tools. *ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming, systems, languages, and applications*, 2003.
- [36] I. Rus, & M. Lindvall. *Knowledge management in software engineering*. IEEE.
- [37] T. Dingsoyr, & D. Smite. *Managing knowledge in global software development projects*. IT Professional, 2014.
- [38] J. Sánchez. "Algunas aproximaciones al problema de financiamiento en las PYMES de Colombia." *Ciencia y técnica*, 321-32, 2007.
- [39] C. Marulanda, M. López, & M. Mejía. "Análisis de la gestión del conocimiento en PYMES de Colombia." *Revista Gerenc. Tecnol. Inform.* 12(33), 2013.
- [40] M. Di Ciano. *Pymes. Rol de la Economía Nacional y características particulares de funcionamiento*. Disponible en <http://www.aduba.org.ar/wp-content/uploads/2016/07/Pymes.pdf>.
- [41] N. Bhuiyan, & B. Amit. "An overview of continuous improvement: from the past to the present." *Management Decision*, 43(5), 761-771, 2005.
- [42] H. Manchanda, A. Agarwal, D. Bhati, & P. Ilango. "Agile Methods for Software Development." *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 3(6), 2017.
- [43] P. Abrahamsson, O. Salo, J. Ronkainen, & J. Warsta. "Agile software development methods: Review and analysis." *VTT publication* 478(107), 2002.

Revisión de enfoques y comparación de recursos para el análisis de sentimientos en español en Twitter

Víctor Rojo¹

Paola Britos²

Florencia Pollo C.³

Universidad Tecnológica Nacional – Argentina

Twitter ha surgido como una plataforma en la que a diario se expresan millones de opiniones las cuales representan un enorme valor para empresas y organizaciones. Para explotar este inmenso corpus de opiniones, el análisis de sentimientos se ha planteado como un método para clasificar la polaridad de los mensajes subjetivos que se comparten en la red social. En vista de que los resultados producidos por los clasificadores de sentimientos a menudo dependen, en parte, de la calidad de los recursos utilizados para la tarea de análisis de sentimientos, este trabajo se enfoca en la corpora, léxicos y herramientas de análisis utilizados en la bibliografía; específicamente, los participantes de TASS 2017. Los resultados de este trabajo aportan una revisión de enfoques, así como un análisis comparativo de los recursos utilizados en el estado del arte y apuntan hacia posibles líneas de investigación relacionadas al análisis de sentimientos en Twitter en español.

1. INTRODUCCIÓN

El servicio de *microblogging* Twitter se mantiene como una de las redes sociales más populares para el intercambio de opiniones en torno a una gran variedad de temas. En la actualidad, se contabilizan cerca de 335 millones de usuarios activos al mes, de los cuales 68 millones pertenecen a los Estados Unidos y los 267 millones restantes a la comunidad internacional [1]. A diferencia de métodos más tradicionales, recolectar y analizar datos de la plataforma es una alternativa que permite encuestar un amplio número de participantes con un menor número de recursos [2]. Por esta razón, áreas relacionadas a las ciencias políticas, económicas, sociales y de investigación de mercado estudian Twitter activamente con un interés especial en las estadísticas agregadas que surgen de los millones de mensajes (o tweets) producidos por sus usuarios todos los días [3]. El conjunto de las opiniones extraídas durante la ejecución de las técnicas resulta de gran valor para empresas, gobiernos y demás organizaciones por sus posibles aplicaciones, entre las cuales se encuentran el delinear perfiles, conocer sentimientos e ideas de futuros consumidores o votantes, relevar expectativas y realizar predicciones. A menudo, el fin de estos procesos es auxiliar en la toma de decisiones estratégicas que se alineen con los objetivos de la organización.

Una de las formas utilizadas para analizar el contenido de los datos de la red social es por medio del análisis de sentimientos, aunque los términos empleados en los trabajos que estudian y exploran el tratamiento computacional de las opiniones, sentimientos y subjetividad en textos incluyen expresiones como minería de opiniones (*opinion mining*), análisis de subjetividad (*subjectivity analysis*) y minería de reseñas (*review mining*), entre otras [4]. En este sentido, los enfoques de las soluciones actuales al problema del análisis de la información subjetiva abarcan una variedad de técnicas pertenecientes a distintas ciencias, campos y subcampos interdisciplinarios como la Lingüística Computacional, el Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN), la Inteligencia Artificial (IA) y la ciencia de los datos, o *Data Science*.

El objetivo principal del análisis de sentimientos consiste en la clasificación automática de textos subjetivos en categorías de polaridad previamente determinadas. Normalmente, el contenido puede ser etiquetado como positivo, negativo o neutral [5], aunque estas agrupaciones pueden variar dependiendo de la granularidad que busque el estudio. En el pasado, el análisis de sentimientos se ha aplicado a distintos medios como blogs, foros y otros documentos, y los retos relacionados a la tarea han sido ampliamente documentados y estudiados. Como indica [6], entre los desafíos comúnmente tratados en el dominio están la separación de cadenas de texto en segmentos para su procesamiento (*tokenization*), eliminación de palabras que no contengan una carga de polaridad (*stop words*), la detección y manejo de negaciones en las oraciones y la presencia de contenido multimodal en estos medios.

Adicionalmente, Giachanou y Crestani [6] señalan que, como resultado de las características propias de la red social, existen elementos particulares que deben ser considerados en el análisis de sentimientos en Twitter. Por ejemplo, aunque fue aumentado recientemente [7], el límite de 280 caracteres impuesto a los mensajes por la plataforma tiene como efecto textos cortos que con regularidad hacen uso de abreviaciones. Lo que complica en mayor medida la tarea es el uso del lenguaje informal por parte de los usuarios para expresar sus opiniones. Debido a esta característica, es posible que en el contenido figuren faltas ortográficas, elongación de palabras para indicar énfasis, uso de *slang*, lenguaje figurado, ironía o sarcasmo y la codificación de emociones en *emoticons*. Por último, a causa de la audiencia internacional con la que cuenta el servicio de microblogging, con frecuencia se pueden encontrar mensajes escritos

¹ vmrojo@gmail.com

² pbritos@unrn.edu.ar

³ fpollo@posgrado.frba.utn.edu.ar

en múltiples idiomas o en una mezcla de los mismos. En conjunto, estas dificultades hacen que el análisis de sentimientos en Twitter sea una tarea no trivial [6]. El formato con el que se presentan los contenidos ante el usuario se puede consultar en la Figura 1, la cual ilustra el primer mensaje que se publicó en el sitio de Twitter y que presenta ejemplos del cuerpo del tweet, contador de réplicas, retweets y favoritos, nombre de usuario y opción para convertirse en seguidor del autor, así como otra información relevante [8].



Figura 1. Ejemplo de un tweet

De la misma forma, en la Figura 2 se puede observar una de las réplicas dirigidas hacia la publicación anterior unos años después. En el nuevo mensaje se pueden apreciar ejemplos de menciones tanto para el autor original (@jack), como para la cuenta oficial del servicio (@twitter), al igual que el uso de hashtags para asociar el comentario a dos temas relacionados a Twitter.



Figura 2. Ejemplo de respuesta a un tweet

Además de la interfaz de usuario, estas características y otra metadata que puede resultar de interés puede ser recuperada por medio del API oficial, después de realizar unos simples pasos de configuración.

2. ENFOQUES DEL ANÁLISIS DE SENTIMIENTOS

La mayoría de las técnicas a menudo empleadas para el reconocimiento de la polaridad de los textos subjetivos pueden ser separadas, *grosso modo*, en tres enfoques: basadas en el léxico, en aprendizaje automático y el abordaje híbrido [8]. Sin embargo, las clasificaciones nombradas no son exhaustivas y en la literatura es posible encontrar soluciones que no se adaptan por completo a uno de los tres paradigmas mencionados. Las características de cada uno de estos enfoques se plantean a continuación.

2.1 Enfoque basado en léxico

Uno de los primeros enfoques que se popularizó entre la comunidad de investigadores dedicada al análisis de sentimientos fue el uso de técnicas basadas en léxico. Los métodos encontrados en esta categoría tratan de realizar las clasificaciones de polaridad de los textos por medio de colecciones de elementos que han sido previamente analizados, a menudo en un proceso manual realizado por humanos con conocimiento de los términos. Es común que en los léxicos se marquen estos elementos con etiquetas que describan la connotación a la que tienden (negativo o positivo, en el caso más básico), o con valores numéricos en una escala predeterminada para indicar tanto su polaridad como su intensidad (-5 a +5, por ejemplo). Existen algunos diccionarios que además realizan una asociación de las palabras a distintos sentimientos, entre los que se pueden encontrar el enojo, la tristeza, el miedo o la sorpresa.

Formalmente, los términos que se recolectan en un léxico se pueden entender como secuencias de uno o varios elementos; secuencias que se componen únicamente por un elemento reciben el nombre especial de unigramas, mientras que a las secuencias que tienen dos y tres elementos se les denomina bigramas y trigramas, respectivamente. Para generalizar, n-grama se refiere entonces a una cadena con n elementos. Si bien un elemento sigue siendo una abstracción, para el caso del procesamiento del lenguaje natural en textos esto puede ser entendido como una letra, sílaba o palabra. Posiblemente por ser una de las opciones más naturales, muchos de los léxicos que se usan para el análisis de sentimientos se pueden definir como diccionarios de palabras, aunque estos no siempre se limitan al uso de unigramas en sus listas.

Habiendo descrito el formato del léxico, realizar el análisis básico de un texto para identificar la polaridad de las opiniones expresadas resulta una tarea sin mucha complejidad. El objetivo en este proceso es comparar el contenido del mensaje con los términos en el diccionario. En este tipo de enfoque, la polaridad se determina por medio de una fórmula que considere los valores listados en el léxico para predecir la carga sentimental del mensaje. Si bien el

enfoque resulta sencillo y directo en comparación a otras técnicas que se describirán en los siguientes puntos, cuenta con algunas desventajas dada la complejidad inherente de los lenguajes y su uso durante la comunicación, así como la naturaleza del ambiente de las redes sociales. Uno de los principales problemas que presenta es su limitada capacidad para manejar negaciones en los mensajes. Por ejemplo, en un mensaje tan simple como “No me gusta”, se puede encontrar una palabra con carga negativa (“No”), así como una positiva (“gusta”). Dependiendo de la evaluación de los valores asignados a cada palabra en el léxico, el resultado del análisis puede variar, sin embargo, para una persona, es claro que el mensaje tiene una connotación negativa.

Algunos casos con uso de negaciones se pueden llegar a tratar haciendo uso de n-gramas mayores a 1 (“no me gusta”), mas no resulta práctico a la hora de considerar todos los casos reales y sus variaciones. Considerando que la utilidad de un diccionario está sujeta a los términos en el mismo, un inconveniente que surge a raíz de esto es la constante necesidad de ser actualizados; especialmente por la informalidad del lenguaje y el uso intensivo de slang que se maneja en las conversaciones entre los usuarios. Por último, los léxicos disponibles para el análisis de sentimientos en Twitter suelen centrarse alrededor de un solo lenguaje, por lo que sería necesaria la incorporación de varios léxicos al analizar mensajes que contengan una mezcla de idiomas.

2.2 Enfoque basado en aprendizaje automático

Otra de las propuestas que los investigadores han desarrollado para el análisis de los textos y la identificación de sentimientos en su contenido se centra alrededor de técnicas relacionadas a la inteligencia artificial utilizadas en conjunto con grandes volúmenes de datos. En este sentido, la tarea resulta particularmente adecuada para este tipo de soluciones debido al rol que redes sociales como Twitter pueden tener como grandes repositorios de datos. Tradicionalmente, el objetivo es planteado en este campo como un problema de clasificación [9]. La aplicación de técnicas estadísticas sobre un set de datos es lo que le permite a una computadora aprender y realizar las predicciones o clasificaciones correspondientes, aunque puede que estas no siempre sean acertadas. La generalización necesaria para la clasificación de los mensajes se da a raíz de una serie ejemplos proporcionados en forma de un *dataset* o corpus en una etapa inicial. A esta etapa, en la jerga del dominio, se le denomina fase de entrenamiento y su correcto desempeño tiene un impacto sobre los resultados del clasificador. Los datos en los conjuntos de entrenamiento tienen características especiales que dependen del tipo de aprendizaje automático empleado. En la bibliografía del análisis de sentimientos en Twitter se pueden encontrar aplicaciones de métodos supervisados, no supervisados y semi-supervisados.

- Métodos supervisados.** Para el caso del aprendizaje automático con métodos supervisados, el entrenamiento de los modelos se lleva a cabo usando datos que han sido previamente etiquetados. Las etiquetas de polaridad, al igual que en el enfoque basado en léxicos, suelen indicar si el mensaje tiene una connotación positiva o negativa, y pueden extenderse para describir neutralidad, falta de emoción o diversas intensidades. Los procesos de clasificación de los datos de entrenamiento tienden a ser realizados por equipos de humanos que leen, interpretan y asignan la etiqueta idónea para cada mensaje. En vista de que hay distintas regulaciones que se deben contemplar e implementar para lograr un correcto etiquetamiento de los datos, y sumado al hecho de que un set de entrenamiento se puede componer de miles de mensajes, o incluso millones, la confección de estos datasets resulta muy costosa. No obstante, se han explorado soluciones que buscan aminorar el esfuerzo requerido para este tipo de tareas, tales como el uso de técnicas colaborativas o de *crowdsourcing* y los métodos semi-supervisados de aprendizaje automático. En la Figura 3, se muestra una representación gráfica donde se ilustran las distintas etapas que comúnmente componen el proceso de análisis de sentimientos que hace uso del método supervisado de aprendizaje automático según [6].

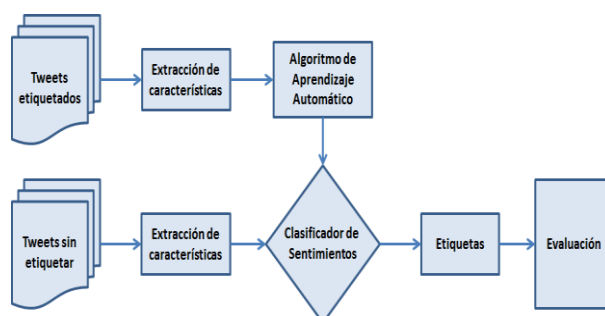


Figura 3. Proceso típico de análisis de sentimientos basado en método supervisado

- Método semi-supervisado.** Como mencionan Davidov, Tsur y Rappoport [10], el objetivo de este enfoque es tomar ventaja de la vasta cantidad de mensajes, originalmente sin anotaciones de polaridad en su estado natural, para mejorar la eficacia de los clasificadores; esto se logra por medio de un proceso iterativo en el que se combina el uso de datos etiquetados y no etiquetados. Los pasos básicos para llevar a cabo el método semi-supervisado involucran, en una primera instancia, preparar un clasificador con el corpus de mensajes de entrenamiento que incluye etiquetas de polaridad. Una vez finalizado el primer entrenamiento del modelo, se aplica el clasificador

sobre un segundo corpus compuesto por datos no etiquetados para generar probabilidades de clases de sentimiento para cada mensaje. De los resultados se seleccionan las publicaciones con una alta probabilidad para integrarse al corpus de entrenamiento, mientras que el resto se queda en el set no etiquetado. El proceso se puede repetir por un número definido de iteraciones o hasta que el estado del corpus de entrenamiento sea satisfactorio.

- *Métodos no supervisados.* Al igual que los otros enfoques dentro de la familia de los métodos basados en el aprendizaje automático, también hacen uso de textos subjetivos para el entrenamiento de sus clasificadores; a diferencia de los anteriores, en los que se lleva a cabo una selección de características en base a los contenidos de la publicación, en los métodos no supervisados se puede hacer uso de datos sin etiquetar para ganar información contextual de grandes colecciones de mensajes [11]. Mientras que los datos usados para los métodos supervisados suelen ser más escasos por los costos en los que se incurren durante su elaboración, en el enfoque no supervisado se alcanzan nuevas órdenes de magnitud al usar decenas de millones de tweets de fácil acceso y que no requieren de un procesamiento significativo. Este gran volumen de datos es esencial para la aplicación de técnicas como *embeddings* de palabras o caracteres o para proporcionar buenos parámetros de inicialización para los modelos a entrenar, algunos factores que determinan la eficacia del clasificador [12].

Una vez que se ha determinado el set de entrenamiento, cada mensaje etiquetado es procesado para realizar una extracción de características. Se debe prestar atención a su selección, ya que éstas, al igual que el algoritmo de aprendizaje automático elegido para la tarea, tendrán un impacto sobre el desempeño del clasificador resultante.

2.3 Enfoque híbrido

Las soluciones de este tipo y como lo insinúa su nombre, tratan de mejorar el desempeño de los clasificadores automáticos complementando los enfoques descritos hasta el momento por medio de la combinación de dos o más de sus técnicas. Por ejemplo, en este grupo se ubican los trabajos que experimentan con el uso de un clasificador SVM o Naive Bayes, los dos del tipo de aprendizaje automático supervisado, alimentado por puntuaciones realizadas por un proceso en base a léxico [13]. De la misma forma califican aquellos estudios que realizan minería de opiniones por medio de una combinación de SVM y redes neuronales [14], ambos del área del aprendizaje automático supervisado y no supervisado, respectivamente. En los trabajos anteriores, los investigadores reportan resultados superadores en el caso de los métodos híbridos en comparación a las soluciones que se centraron únicamente en resolver el problema con un enfoque, ya sean basadas en léxico o en aprendizaje automático.

2.4 Otros enfoques

En su trabajo [6], Giachanou y Crestani realizan un análisis de varias soluciones que no logran ser encuadradas por completo por uno de los tres enfoques descritos en los puntos anteriores. En esta categoría identifica trabajos novedosos que afrontan el problema con ideas influenciadas por teorías pertenecientes a disciplinas como la psicología y la sociología o por métodos como el análisis formal de conceptos.

3. RESULTADOS

En el análisis de sentimientos en la red social Twitter existen varios recursos que se utilizan en los enfoques descritos para auxiliar en la tarea de clasificación de mensajes. Estos recursos son empleados en las soluciones para el diseño, implementación, entrenamiento y validación de características y clasificadores, por lo que tienen un impacto en los resultados obtenidos. Los recursos en los siguientes puntos fueron identificados tras una revisión de los trabajos presentados en la edición 2017 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) de la competencia afiliada a la Sociedad Española para el Procesamiento del Lenguaje Natural (SEPLN): el Taller de Análisis Semántico en la SEPLN (TASS).

Tabla 1. Participantes en TASS 2017 por orden alfabético

Grupo	Trabajo	Ref.
C100TPUCP	C100TPUCP at TASS 2017: Word Embedding Experiments for Aspect-Based Sentiment Analysis in Spanish Tweets	[15]
ELiRF	ELiRF-UPV en TASS 2017: Análisis de Sentimientos en Twitter basado en Aprendizaje Profundo	[16]
GSI	Applying Recurrent Neural Networks to Sentiment Analysis of Spanish Tweets	[17]
INGEOTEC	A Genetic Programming Approach to Sentiment Analysis for Twitter: TASS'17	[18]
ITAINNOVA	FastText como alternativa a la utilización de Deep Learning en corpus pequeños	[19]
JACERONG	Classifier Ensembles that Push the State-of-the-Art in Sentiment Analysis of Spanish Tweets	[20]
LexFAR	LexFAR en la competencia TASS 2017: Análisis de sentimientos en Twitter basado en lexicones	[21]
OEG	OEG at TASS 2017: Spanish Sentiment Analysis of tweets at document level	[22]
RETUYT	RETUYT en TASS 2017: Análisis de Sentimientos de Tweets en Español utilizando SVM y CNN	[14]
SINAI	SINAI en TASS 2017: clasificación de la polaridad de tweets	[23]
Tecnolengua	Tecnolengua Lingmotif at TASS 2017: Spanish Twitter Dataset Classification Combining Wide-coverage Lexical Resources and Text Features	[24]

En la bibliografía se reconocen distintos tipos de recursos para el análisis de sentimientos en Twitter y para este trabajo se ha decidido agruparlos en las siguientes categorías según sus características y función: corpora, léxicos y herramientas de análisis.

3.1 Corpora

Ya sea que se requieran para el desarrollo de los mismos sistemas o durante su evaluación, en los métodos actuales de análisis de sentimientos es indispensable el uso de sets de datos, o corpora. La formación de estos datasets se facilita gracias herramientas en forma de API que proporciona Twitter, con las cuales se pueden recolectar mensajes en base a búsquedas específicas. Los conjuntos de datos luego son anotados, si el enfoque de análisis de sentimientos lo demanda, por medio de una variedad de técnicas que van desde un trabajo manual a distintos grados de automatización. Las dimensiones analizadas para el caso de este tipo de recurso son:

- *Corpus o Dataset.* El nombre por el cual es conocido o referenciado el set de datos. En caso de múltiples nombres, se considera aquel que sea más prominente en la bibliografía analizada.
- *Autores.* El grupo o sujeto responsable por el desarrollo del recurso léxico. Se indica para poder diferenciar aquellos recursos que no fueron proporcionados por los organizadores de la competencia.
- *Método.* Habla de las técnicas utilizadas para etiquetar los tweets que conforman el corpus o, en su defecto, indica la falta de etiquetas en el mismo.
- *Etiquetas.* Enlista las categorías de polaridad en las que los mensajes fueron clasificados o, en su defecto, señala la falta de las mismas.
- *Positivo.* El número de mensajes o entidades que fueron clasificados por su contenido con carga positiva.
- *Neutral.* El número de mensajes o entidades que fueron clasificados por su contenido con carga neutral.
- *Negativo.* El número de mensajes o entidades que fueron clasificados por su contenido con carga negativa.
- *None.* El número de mensajes o entidades que fueron clasificados por la falta de una carga emocional en su contenido.
- *Tamaño.* La cantidad total de elementos que conforman el cuerpo del corpus. Cabe aclarar que este valor no necesariamente refleja la suma de las cantidades que aparecen en las dimensiones relacionadas a la polaridad; existen casos, en corpora de TASS, por ejemplo, en los que únicamente los subsets de entrenamiento han sido etiquetados, por lo que el tamaño total del corpus es mayor a la cantidad de mensajes anotados.

Los *datasets* encontrados en la bibliografía de los trabajos en TASS 2017, por orden alfabético, son se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Comparación de *datasets* en español identificados en TASS 2017 por orden alfabético

Corpus/Dataset	Autores	Método	Etiquetas	Positivo	Neutral	Negativo	None	Tamaño
DS dataset	Moctezuma et al.	Distant Supervision	P, N	9 millones	-	9 millones	-	18 millones
General Corpus / General TASS	TASS	Semi automático	P+, P, NEU, N, N+, NONE	2,884	670	2,182	1,483	68,017
General Corpus 1K	TASS	-	Sin etiquetas	-	-	-	-	1,000
InterTASS	TASS	Manual	P, NEU, N, NONE	1,116	418	1,404	475	3,413
Mozetič, Grčar & Smailovič corpus	Mozetič, Grčar, Smailovič	Manual	P, NEU, N	69,571	54,017	16,472	-	140,060
RETUYT corpus	RETUYT	Unión	P, NEU, N, NONE	3,358	872	2,819	1,684	8,733
Social_TV	TASS	Manual	P, NEU, N	1,547	999	1016	-	2,773
Spanish Billion Words Corpus and Embeddings	Cardellino	-	Sin etiquetas	-	-	-	-	1,500 millones
STOMPOL	TASS	Manual	P, NEU, N	218	239	586	-	1,284

3.2 Léxicos de Sentimientos

Para los léxicos lingüísticos se han tomado como punto de partida las dimensiones utilizadas por Hinojosa et al. [25]. Además, se ha considerado pertinente agregar información sobre el proceso de creación de los léxicos estudiados ya que estos podrían tener un impacto en el desempeño del recurso; por ejemplo, se ha señalado que en los casos en los que un proceso de traducción automática ha sido usado en un léxico, el resultado de los clasificadores puede depender de la calidad de la traducción [26]. Específicamente, se agregan dimensiones para indicar las fuentes que fueron utilizadas para formar el contenido lingüístico del léxico, los métodos que se aplicaron para su creación y herramientas o agentes que hayan auxiliado durante el proceso. Las dimensiones seleccionadas para la comparación de los recursos léxicos se definen a continuación:

- *Léxico*. El nombre por el cual es conocido el recurso. En el caso de recursos que se conocen por varios nombres, se trataron de incluir aquellos que fueron usados tanto en el trabajo estudiado en TASS como en la publicación original del recurso léxico.
- *Idioma*. El idioma o idiomas en los que está disponible el léxico. Debido a que los recursos fueron utilizados para el análisis de sentimientos en español, las demás dimensiones se enfocan únicamente en las características de esta versión; de no tener una versión en español, se considera el lenguaje al que se le haya aplicado la traducción, según el trabajo que lo usó.
- *Método y Ejecución*. El tipo de método que fue utilizado para la elaboración del léxico y la forma específica en la que fue ejecutado el método de elaboración. Puede referirse una herramienta o técnica, entre otras cosas.
- *Base*. Las fuentes que fueron consultadas o integradas para la confección de las listas de términos en el léxico.
- *Dominio*. El dominio de los términos en el recurso lingüístico. Los valores se pueden ver influenciados dependiendo del contexto.
- *Tamaño*. La cantidad de términos encontrados en el recurso léxico
- *n-grams*. El número de elementos encontrados en las secuencias de los términos.
- *Categorías*. Los nombres de las etiquetas que fueron usadas para categorizar los términos del recurso léxico.
- *Escala*. La escala utilizada para denotar intensidad de la emoción anotada para cada término en el diccionario.

En los trabajos estudiados se identificaron 11 recursos léxicos usados en las soluciones de los equipos participantes. Los resultados de esa revisión fueron recopilados y ordenados en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de recursos léxicos identificados en TASS 2017 por orden alfabético

Léxico	Idioma	Método y Ejecución	Base	Dominio	Tamaño (term.)	n-grams	Categorías	Escala
AFINN-111	Inglés	Manual (autor)	Palabras obscenas Tweets de COP15 Original Balanced Affective Word List Urban Dictionary The Compass DeRose Guide to Emotion Words	General Slang United Nation Climate Conference (COP15)	2,477	1, 2, 3	Positivo Negativo	-5 a +5
ANEW	Inglés	Manual (alumnos)	150 palabras de Mehrabian & Russell (1974) 450 palabras de Bellezza, Greenwald, & Banaji (1986)	General	1,030	1	Placer Excitación Dominación	9 puntos
Dictionary of Affect in Language	Inglés	Manual (voluntarios)	Diccionario Listas de Conte, Plutchik y Russell Selección de un diccionario en Inglés	Palabras emocionales	8,742	1	Agrado Excitación Evocación de imágenes	3 puntos
ElhPolar	Español	Traducción Semi- automática (Diccionario Inglés- Español + Refinamiento)	Opinion Finder lexicon Training corpus (TASS)	General Turismo	4,511 (1,654 pos, 2,857 neg)	1, 2, 3, 4, 5	Positivo Negativo	Binario
iSOL	Español	Traducción Automática (Reverso)	BLEL (Bing Liu)	General Cinema (eSOL)	8,133 (2,509 pos, 5,626 neg)	1	Positivo Negativo	Binario
LexFAR	Español		InterTASS corpus	General	9,058	1		
MADS / Hinojosa corpus	incluye traducci ones del Inglés	Manual (Survey Monkey)	LEXESP Trabajos pasados de los autores	General	875	1	Valencia Excitación Concreción Felicidad Enojo Tristeza Miedo Aversión	9 puntos 5 puntos
ML- SentiCon	Inglés Español Catalán Vasco Gallego	Traducción Automática	SentiWord Net 3.0	General	11,302	1, 2, 3, 4, 5, 6	Positivo Negativo	-1 a +1

NRC / EmoLex	Inglés Otros idiomas	Inglés Manual (Amazon's Mechanical Turk) Otros Idiomas Traducción Automática (Google Translate)	Macquarie Thesaurus General Inquirer WordNet Affect Lexicon	General	14,182 palabras ~25,000 senses*	1	Sentimientos Positivo Negativo Emociones Ira Anticipación Alegría Confianza Miedo Sorpresa Tristeza Aversión	Binario
RETUYT	Español	Combinación (Expansión de lemas con FreeLing)	ML-SentiCon ElhPolar Spanish SO-CAL		4,730		Positivo Negativo	
Strength Lex	Español	Transferencia (Framework)	Opinion Finder lexicon Spanish WordNet WordNet SentiWordNet	General	1,347 (477 pos, 870 neg)	1	Positivo Negativo	Binario

3.3 Herramientas de Análisis

Por último, se ha compilado también una herramienta comparativa para los recursos en la categoría de herramientas de análisis. En esta instancia se han considerado dimensiones que expresen las características del tipo de funciones que cada recurso realiza, intentando que estas se compartan en los distintos tipos de herramientas encontradas. Las dimensiones resultantes para la comparación de los recursos de análisis son las siguientes:

- *Herramienta.* El nombre que recibe la herramienta o por el cual es conocida
- *Tecnología.* Indica de qué forma o para qué lenguajes de programación está disponible la herramienta para los usuarios. Normalmente, coincide con el lenguaje de la implementación
- *Categoría.* Identifica la categoría a la que pertenece la herramienta en relación a las funciones de análisis que desempeña
- *Análisis.* Especifica los tipos de análisis para los que la herramienta está preparada. Esta dimensión se relaciona a la categoría y los elementos listados en estos campos deben pertenecer a la dimensión señalada por la dimensión anterior
- *Modelo.* Aplica únicamente para cierto tipo de categorías. Detalla el modelo que sigue la implementación del análisis
- *Idioma.* La lista de idiomas que soporta la herramienta para desempeñar los análisis que brinda.

En los trabajos se han identificado 16 herramientas que han sido utilizadas por los participantes del taller TASS para realizar las tareas de análisis de sentimientos en español. Los recursos y sus características se presentan a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de herramientas de análisis identificadas en TASS 2017 por orden alfabético

Herramienta	Tecnología	Categoría	Análisis	Modelo	Idioma
B4MSA	Librería (Python)	Implementación de Algoritmos	Clasificador	SVM	Multilingüe
EvoDAG	Librería (Python)	Implementación de Algoritmos	Clasificador	Algoritmo Genético	-
FastText	Librería (C++)	Representación de Palabras Herramienta de Análisis de Sentimiento	Vectores de Palabras Análisis de Sentimientos	NN (para vectores)	Multilingüe
FreeLing	Librería (C++)	Paquete PLN	Análisis Morfológico Reconocimiento de Entidades Nombradas POS tagger Desambiguación Lingüística Etiquetado de Roles Semánticos	-	inglés, español, portugués, italiano, francés, alemán, ruso, catalán, gallego, croata, esloveno, otros
IBM Watson Natural Language Understanding	Cloud API	Paquete PLN	Identificación de Categorías, Conceptos, Emociones, Entidades, Palabras clave, Metadatos, Relaciones, Roles Semánticos,	-	inglés (default), árabe, chino (simplificado), holandés, inglés, francés, alemán, italiano, japonés, coreano, portugués, ruso, español, sueco (depende de función)

Sentimientos					
IXA-pipes	Librería (Java)	Implementación de Algoritmos	POS tagger, Lematizador, Constituent Extractor,	-	vasco, holandés, inglés, francés, gallego, alemán, italiano y español (depende de función)
Keras	Librería (Python)	Implementación de Algoritmos	Red Neuronal	CNN, RNN	-
Lingmotif Learn	Aplicación de Escritorio	Herramienta de Análisis de Sentimiento	Análisis de Sentimientos Visualizaciones	-	inglés, español
Moriarty®	Web API	Transformaciones de Textos	Lematizador Stop words	-	inglés, español
NLTK	Librería (Python)	Paquete PLN	Clasificadores Tokenizador Stemming, POS tagger Otros	-	Inglés
scikit-learn	Librería (Python)	Implementación de Algoritmos	Clasificadores Regresiones Clustering Reducción de Dimensionalidad	Varios	-
TensorFlow	Librería (Python, C)	Implementación de Algoritmos	Red Neuronal	NN	-
TreeTagger	Scripts	Paquete PLN	POS tagger Lematizador	-	Soporte para español
Tweetmotif	Librería (Python, Java)	Motor de Búsquedas	Búsquedas Identificación de Temas Resumen Tokenizador	-	-
Weka	Aplicación de Escritorio	Implementación de Algoritmos	Implementaciones de Aprendizaje Automático Funciones para Minería de Datos Visualizaciones	Varios	-
Word2Vec	Depende (en TASS: Python, C)	Representación de Palabras	Vectores de Palabras	Word2Vec	-

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha llevado a cabo una revisión del estado del arte en el dominio del análisis de sentimientos en español, específicamente en el ambiente de la red social y servicio de microblogging de Twitter, en base a los trabajos presentados en la edición 2017 del Taller de Análisis Semántico en la SEPLN (TASS).

La exploración del análisis de sentimientos en Twitter en lenguajes diferentes al inglés es una necesidad que ha sido reconocida por investigadores dentro de la comunidad hispanohablante, así como aquellos que no forman parte de ella [27]. El desafío de la clasificación de tweets se trata de afrontar por medio de recursos que ayuden en las tareas de transformación de texto y extracción de características. Debido a que la mayoría de los trabajos en el dominio se enfocan en solucionar el problema considerando únicamente un idioma, los recursos creados varían en calidad y cantidad al pasar de un lenguaje a otro. Al contar con el mayor número de herramientas en inglés, la solución de algunos investigadores ha sido, en ocasiones, optar por traducciones automáticas de recursos léxicos para adaptarlos al análisis de tweets en español [8], [26]; sin embargo, como han señalado algunos autores, los resultados pueden variar dependiendo de la calidad de la traducción automática [26]. Es por esta razón que los investigadores con foco en el análisis de sentimientos en Twitter en español han puesto en evidencia en varios estudios [28], [29] la falta de recursos dedicados a este lenguaje.

En las categorías de recursos discutidas en este trabajo se pueden apreciar puntos de mejora en lo relacionado a los recursos para el análisis de sentimientos en español en Twitter. En el área de los sets de datos de entrenamiento, al considerar el dominio de los mismos, se observa la falta de corpora compuesta en su mayoría o totalidad por mensajes con un contenido sarcástico o con uso de negaciones. Aunque a menudo se mencionan entre una de las complicaciones más comunes a la hora de realizar ejercicios de análisis de sentimientos, los datasets estudiados no resaltan la incorporación de mensajes con estas características durante su elaboración. Esta misma área de vacancia ha sido señalada por otros investigadores anteriormente [29].

Relacionado a los recursos léxicos utilizados ampliamente en las propuestas de los investigadores, se observa que pocos recursos de este tipo toman en cuenta el manejo del slang entre los elementos que los conforman. De los recursos estudiados, únicamente el léxico ANEW y el léxico ElhPolar expresan haber usado una fuente para agregar términos de slang de Internet. De la misma forma, en el trabajo de Cruz et al. [30] se comenta que el léxico de Bing Liu (BLEL) agrega términos informales a la composición del léxico. Si bien estos recursos son reconocidos y utilizados

para el análisis de sentimientos, dos de ellos fueron diseñados originalmente para el idioma inglés; por esta razón, se justifica un trabajo similar que contemple el uso de slang para el español.

Tomando en cuenta que los resultados de los clasificadores pueden variar ampliamente dependiendo de la calidad de los recursos léxicos y las herramientas para el pre-procesamiento de los datos involucrados, se considera pertinente focalizar la atención y el esfuerzo en el área de los recursos para el análisis de sentimientos. La falta de variedad en los recursos es una problemática que ha sido identificada por parte de la comunidad dedicada al estudio del análisis de sentimientos en Twitter, por lo que la creación de nuevos recursos exclusivos para el español podría reducir la brecha entre los materiales disponibles para el español y lenguajes como el inglés, los cuales cuentan con un gran número de diccionarios, corpora y otras herramientas de calidad para el desarrollo de la tarea.

REFERENCIAS

- [1] Twitter Investor Relations, «Twitter,» 27 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://twitter.com/i/moments/1022804623717875712>. [03 Octubre 2018].
- [2] L. Karami, S. Bennett and X. He, "Mining Public Opinion about Economic Issues: Twitter and the U.S. Presidential Election," *International Journal of Strategic Decision Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 18-28, 2018.
- [3] S. Rosenthal, N. Farra and P. Nakov, "SemEval-2017 Task 4: Sentiment Analysis in Twitter," in *11th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2017)*, 2017.
- [4] N. Pang y L. Lee, «Opinion Mining and Sentiment Analysis,» *Foundations and Trends® in Information Retrieval*, vol. 2, n° 1-2, pp. 1-135, 2008.
- [5] M. A. Escortell Pérez, M. Giménez Fayos and P. Rosso, "El Impacto de las Emociones en el Análisis de la Polaridad en Textos con Lenguaje Figurado en Twitter," *Procesamiento del Lenguaje Natural*, no. 58, pp. 85-92, Marzo 2017.
- [6] A. Giachanou and F. Crestani, "Like It or Not: A Survey of Twitter Sentiment Analysis Methods," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 49, no. 2, Noviembre 2016.
- [7] Rosen and I. Ihara, "Twitter Blog," Septiembre 2017. [Online]. Available: https://blog.twitter.com/official/en_us/topics/product/2017/Giving-you-more-characters-to-express-yourself.html.
- [8] J. Dorsey, «Twitter,» 21 Marzo 2006. [En línea]. Available: <https://twitter.com/jack/status/20>. [07 Agosto 2018].
- [9] J. Wehrmann, W. Becker, H. E. L. Cagnini and R. C. Barros, "A Character-Based Convolutional Neural Network for Language-Agnostic Twitter Sentiment Analysis," in *Neural Networks (IJCNN), 2017 International Joint Conference*, Anchorage, AK, USA, 2017.
- [10] L. F. Hurtado Oliver, F. Pla and D. Buscaldi, "ELiRF-UPV en TASS 2015: Análisis de Sentimientos en Twitter," in *TASS workshop at SEPLN 2015*, 2015.
- [11] Davidov, O. Tsur y A. Rappoport, «Semi-supervised recognition of sarcastic sentences in Twitter and Amazon,» de *CoNLL '10 Proceedings of the Fourteenth Conference on Computational Natural Language Learning*, 2010.
- [12] P. Segura, A. Quirós and P. Martínez, "Exploring Convolutional Neural Networks for Sentiment Analysis of Spanish Tweets," in *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics*, Valencia, España, 2017.
- [13] A. Severyn y A. Moschitti, «Twitter Sentiment Analysis with Deep Convolutional Neural Networks,» de *Proceedings of the 38th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, Santiago, Chile, 2015.
- [14] O. Kolchyna, T. T. P. Souza, P. C. Treleaven and T. Aste, "Twitter Sentiment Analysis: Lexicon Method, Machine Learning Method and Their Combination," *Handbook of Sentiment Analysis in Finance*, 2015.
- [15] A. Rosá, L. Chiruzzo, M. Etcheverry y S. Castro, «RETUYT en TASS 2017: Análisis de Sentimientos de Tweets en Español utilizando SVM y CNN,» *Proceedings of TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, pp. 77-83, 2017.
- [16] F. Tume Fiestas y M. A. Sobrevilla Cabezado, «C100TPUCP at TASS 2017: Word Embedding Experiments for Aspect-Based Sentiment Analysis in Spanish Tweets,» *TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, pp. 85-90, 2017.
- [17] L. F. Hurtado, F. Pla y J. González, «ELiRF-UPV en TASS 2017: Análisis de Sentimientos en Twitter basado en Aprendizaje Profundo,» de *Proceedings of TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, 2017.
- [18] O. Araque, R. Barbado, J. F. Sánchez-Rada y C. A. Iglesias, «Applying Recurrent Neural Networks to Sentiment Analysis of Spanish Tweets,» de *Proceedings of TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, 2017.
- [19] Moctezuma, M. Graff, S. Miranda, E. S. Tellez, A. Coronado, C. N. Sánchez and J. Ortiz, "A Genetic Programming Approach to Sentiment Analysis for Twitter: TASS'17," in *Proceedings of TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, 2017.
- [20] R. M. Montañés, R. del Hoyo, J. Veá, R. Aznar and F. J. Lacueva, "FastText como alternativa a la utilización de Deep Learning en corpus pequeños," in *Proceedings of TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, 2017.
- [21] A. Cerón, «Classifier Ensembles that Push the State-of-the-Art in Sentiment Analysis of Spanish Tweets,» de *Proceedings of TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, 2017.
- [22] A. Reyes, F. Paniagua, B. Priego y M. Tovar, «LexFAR en la competencia TASS 2017: Análisis de sentimientos en Twitter basado en lexicones,» *TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, pp. 51-57, 2017.
- [23] L. Navas y V. Rodríguez, «OEG at TASS 2017: Spanish Sentiment Analysis of tweets at document level,» de *Proceedings of TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, 2017.
- [24] C. García, A. Montejo-, M. C. Díaz y S. M. Jiménez, «SINAI en TASS 2017: clasificación de la polaridad de tweets,» de *Proceedings of TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, 2017.
- [25] A. Moreno y C. Pérez, «Tecnología Lingmotif at TASS 2017: Spanish Twitter Dataset Classification Combining Wide-coverage Lexical Resources and Text Features,» de *Proceedings of TASS 2017: Workshop on Semantic Analysis at SEPLN*, 2017.
- [26] J. A. Hinojosa, N. Martínez, C. Villalba, U. Fernández, A. Sánchez, M. A. Pozo and P. R. Montoro, "Affective norms of 875 Spanish words for five discrete emotional categories and two emotional dimensions," *Behavior research methods*, vol. 48, no. 1, pp. 272-284, 2016.

- [27] Vilares, M. A. Alonso and C. Gómez, "Supervised Sentiment Analysis in Multilingual Environments," *Information Processing & Management*, vol. 53, no. 3, pp. 595-607, Mayo 2017.
- [28] P. Nakov, "Semantic Sentiment Analysis of Twitter Data," in *Encyclopedia on Social Network Analysis and Mining (ESNAM)*, 2017.
- [29] Sidorov, S. N. Galicia and V. A. Camacho, "Construcción de un corpus marcado con emociones para el análisis de sentimientos en Twitter en español," *Revista Escritos BUAP*, vol. 1, no. 1, 2016.
- [30] S. M. Jiménez, M. T. Martín, E. Martínez and L. A. Ureña, "Studying the Scope of Negation for Spanish Sentiment Analysis on Twitter," *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2017.
- [31] L. Cruz, J. A. Troyano, B. Pontes y F. J. Ortega, «Un lexicón multilingüe de polaridades semánticas a nivel de lemas,» *Procesamiento del Lenguaje Natural*, nº 53, 2014.

Predicción del tráfico de una red inalámbrica basada en redes neuronales artificiales mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt

Ramiro Osorio D.¹

Martha Y. Segura R.²

Mauricio A. Villalba³

Universitaria Agustiniiana Uniagustiniana – Colombia

Este capítulo se desarrolla dentro del marco del proyecto de investigación “Predicción del tráfico de red de las aplicaciones web en la nube nativa basada en redes neuronales artificiales mediante software libre” en la Universitaria Agustiniiana. Como consecuencia del estudio y análisis en la investigación se desarrolla un prototipo en software libre que permita realizar la predicción del consumo de ancho de banda de la red cuando se usan aplicaciones web conectadas a la nube, con el fin de alcanzar la máxima productividad en la solución de problemas computacionales actuales, basado en la metodología propuesta. En el presente trabajo se muestra el algoritmo de entrenamiento de redes neuronales Levenberg-Marquardt (LM), que permite modelar una red neuronal multicapa, con un mínimo de tres capas, con el fin de aprender y predecir la medición del tráfico de red una inalámbrica, y validar el comportamiento del parámetro de red, consumo de ancho de banda, para optimizar en el tiempo los recursos de red y asegurar el mejoramiento de la calidad del servicio en aplicaciones. Como menciona [1] *“El tráfico producido en una red de computadoras no es más que una serie de tiempo, es decir un conjunto de valores de un mismo atributo censados en períodos regulares”*. Para efectuar la predicción del tráfico de la red inalámbrica se realiza una captura de datos almacenados en una matriz (data set), realizando siete experimentos, variando el número de capas de las redes neuronales y verificando el número óptimo de capas. Para cada experimento se aplica el algoritmo de entrenamiento Levenberg-Marquardt (LM), dando como resultado que las neuronas aprendan a tomar esos datos, aplicando la Inteligencia Artificial, donde el Error Mínimo Cuadrado tienda a ser aproximado a cero y generando un modelo de predicción del ancho de banda. *“Se requiere un sistema de predicción de tráfico para propósitos de planeación y dimensionamiento, esto permitirá pronosticar las demandas de tráfico según períodos de tiempo anteriores”* [2].

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las pequeñas y medianas empresas tienen recursos limitados con relación al software, conectividad e infraestructura que no permiten una alta productividad en sus procesos, generando pérdidas a largo plazo, por tal razón se deben desarrollar herramientas acordes a sus necesidades para una toma de decisiones acertada. La incursión de la Inteligencia Artificial en especial de los algoritmos de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) permite diseñar herramientas específicas para la optimización de sus recursos. “Un modelo basado en RNA es capaz de encontrar relaciones (patrones) de forma inductiva por medio de varios algoritmos de aprendizaje basados en los datos existentes” [1].

La investigación se basa en el estudio y aplicación de un algoritmo de redes neuronales artificiales como método para predecir el comportamiento del tráfico de la red inalámbrica (consumo de ancho de banda) desde la pyme hacia la nube nativa, mediante un prototipo basado en software libre que contribuye a la optimización de los recursos de red que soportan las aplicaciones web. El tráfico de una red se comporta como una serie de tiempo, “para predecir series de tiempo se han utilizado las redes neuronales alimentadas hacia adelante (feed-forward) y las redes recurrentes (recurrent)” [2]. De acuerdo con la literatura, “las redes neuronales artificiales se han convertido en uno de los métodos de predicción para series de tiempo, debido a su capacidad de adaptación y representación de procesos no lineales” [4]. Así mismo, “los modelos de tráfico a través de series de tiempo son beneficiosos para: la planeación de cobertura, reservación de recursos, monitoreo de la red, detección de anomalías, y producción de modelos de simulación más exactos, en la medida en que pueden pronosticar el tráfico en un tiempo de escala determinado” [5].

Este estudio de investigación aplica la analítica predictiva usando redes neuronales artificiales para dimensionar el desempeño del ancho de banda que es accedido mediante una red inalámbrica. Los clientes de las pequeñas y medianas empresas para conectarse a las aplicaciones web cuentan con un ancho de banda limitado debido a sus costos; esto ralentiza sus conexiones y por ende el rendimiento de estas, dando como resultado la improductividad, afecta también el número de usuarios que están conectados a la nube mediante la red inalámbrica y por consiguiente se ve desmejoramiento en dicha conexión.

No todas las pymes tienen la capacidad económica para aumentar su ancho de banda, y otro factor fundamental es la ubicación geográfica de la empresa, ya que en algunos sitios el canal es demasiado pobre; y por ende impide tener una buena comunicación entre el usuario y la aplicación web. Estudios de predicción de tráfico usando redes neuronales se enfocan en el modelamiento de tráfico sobre las redes área local, pero no hacia las conexiones inalámbricas. Desde el inicio de las RNA en el siglo anterior, muchos investigadores han planteado modelos y algoritmos para lograr que las neuronas sean capaces de aprender, cada uno sustentado en modelos matemáticos. Por lo anterior, para este trabajo se selecciona un algoritmo de entrenamiento de redes neuronales, que en estudios anteriores ha demostrado ser eficiente para la predicción de tráfico de red [6], el algoritmo Levenberg-Marquardt.

¹ ramiro.osorio@uniagustiniana.edu.co

² martha.segura@uniagustiniana.edu.co

³ mauricio.alonso@uniagustiniana.edu.co

2. MÉTODO

2.1 Algoritmo Levenberg-Marquardt

El algoritmo Levenberg-Marquardt se aplica principalmente a redes neuronales multicapa con un número grande de patrones ya que tiene la velocidad de convergencia del Error Cuadrado Medio (MSE, por sus siglas en inglés) más rápida hasta ahora, en problemas de aproximación de funciones a pesar de que su complejidad en cálculos es mayor [7], [8], superando al Retropropagación (*backpropagation*). Usa la metodología del algoritmo Retropropagación empleando los conceptos de la regla delta generalizada (*generalized delta rule*), la tasa de aprendizaje (*learning rate*), y el modo por lotes (*batch mode*), sólo que el gradiente se calcula mediante la matriz Jacobiana de los errores de las neuronas de salida. Con la ecuación (1) se actualizan los pesos.

$$w(n+1) = w(n) - \alpha \cdot w(n-1) - \frac{J^T \cdot e}{J^T \cdot J + \mu \cdot I} \quad (1)$$

donde J es la matriz Jacobiana de los errores de las neuronas de salida, es decir, la matriz de las primeras derivadas de dichos errores con respecto a los pesos y umbrales (θ) de los que son función, J^T es la traspuesta de la matriz Jacobiana, I es la matriz identidad (unos en la diagonal y ceros en las demás localidades) del mismo tamaño que la matriz Jacobiana, e es el vector de errores de las neuronas de salida, α es la constante de impulso (del inglés momentum constant), y μ es una constante equivalente a la tasa de aprendizaje que es decrecida en cada iteración en la que se observa una reducción del MSE, o incrementada, y se descartan los pesos actualizados cuando se obtiene un aumento en el MSE. Este algoritmo, aunque requiere de mayor número de cálculos que el Retropropagación, evita más las oscilaciones del MSE, y la matriz Jacobiana es la que hace que se tenga una convergencia demasiado rápida, incluso hasta más de 100 veces más rápida que la obtenida por el Retropropagación con su algoritmo Descenso del Gradiente (del inglés Gradient Descent) [7], [8]. Supongamos que la función de error se puede expresar en la ecuación (2).

$$f(w) = \sum_{i=0}^m e_i^2(\omega) \quad (2)$$

Donde m es el número de instancias (tamaño) del conjunto de datos de entrenamiento, y $e_i^2(w)$ es el error que se comete en la instancia i-ésima. La matriz Jacobiana de la función de error (ecuación (3)) se calcula como la formada por las derivadas de los errores con respecto a los parámetros (ecuación (4)).

$$J_{ij}(w) = \frac{\partial e_i}{\partial w_j} \text{ Donde } i=1, \dots, m \text{ y } j=1, \dots, n \quad (3)$$

$$Jf = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Donde m es el tamaño del conjunto de datos, y n el número de parámetros en la red neuronal. El vector gradiente de la función de error en la ecuación (5) se puede calcular (donde e es el vector de todos los términos de error).

$$\nabla f = 2J^T e \quad (5)$$

Finalmente, la ecuación (6) el Hessiano se puede aproximar (donde λ es el factor de amortiguamiento que asegura la positividad del Hessiano, e I es la matriz de identidad).

$$H \approx 2J^T J + \lambda I \quad (6)$$

A partir de las igualdades anteriores en la ecuación (7) se define el proceso de mejora de parámetros con el algoritmo de Levenberg-Marquardt:

$$w_{i+1} = w_i - (J_i^T J_i + \lambda_i I)^{-1} (2J_i^T e_i) \quad (7)$$

Cuando $\lambda=0$ se obtiene el método de Newton utilizando el Hessiano aproximado. Si λ es muy grande, se convierte en el algoritmo de Descenso del Gradiente con una tasa de entrenamiento pequeña. Por ello, λ_0 se inicializa para que sea grande, de modo que las primeras actualizaciones sean pequeños pasos en la dirección de Descenso del Gradiente. Si alguna iteración genera un fallo, entonces λ se incrementa por algún factor, si no, a medida que disminuye el error, λ disminuye, de manera que el algoritmo de Levenberg-Marquardt se aproxima al método de Newton. Este proceso normalmente acelera la convergencia al mínimo [7], [8].

2.2 Metodología para predicción de tráfico

La metodología desarrollada en la investigación (Figura 1) para la predicción de tráfico del consumo del ancho de banda en una red inalámbrica basada en redes neuronales se compone de 7 etapas: 1) Recopilar datos desde la red inalámbrica, 2) proceso de preparación y limpieza de datos, 3) proceso de análisis de correlación, 4) proceso de análisis de la variable ancho de banda, 5) proceso para utilizar algoritmo Levenberg-Marquardt, 6) proceso para modelo de predicción con MATLAB, y 7) proceso para interpretación y evaluación.

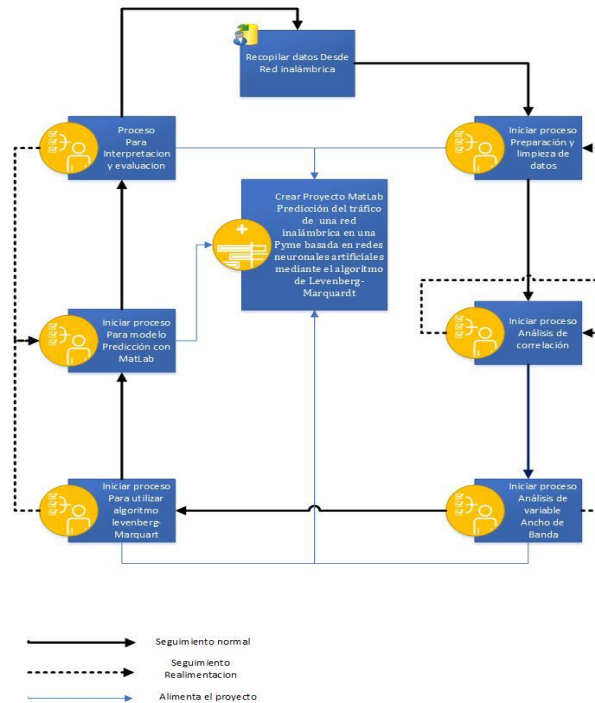


Figura 1. Metodología propuesta

2.3 Software de simulación

Para la simulación del modelo de red neuronal se ha utilizado MATLAB, que es un software que cuenta con una caja de herramientas de redes neuronales (Neural Network Toolbox). Esta herramienta entrena redes neuronales por aprendizaje supervisado, no supervisado y diseño directo. Las redes neuronales que se crean en MATLAB son objetos con diferentes campos o propiedades. El aprendizaje de la red neuronal se realiza modificando los pesos y ganancias, así al final del proceso se tiene el comportamiento deseado. En MATLAB existen reglas de aprendizaje para las RNA, que pueden ser orientadas al entrenamiento incremental o al entrenamiento por lotes.

3. RESULTADOS

3.1 Proceso y resultados

Por medio de MATLAB, se realiza una comprobación de uso de redes neuronales para predecir el comportamiento del consumo del ancho de banda en una red inalámbrica, utilizando el algoritmo de entrenamiento Levenberg-Marquardt. Para realizar este entrenamiento se deben realizar los siguientes pasos:

1. Realizar la toma de datos (Data Set) para entrenamiento.
2. Preparar los datos por medio de MATLAB con un script que procese lo siguiente; leer el data set, etiquetar los datos (Target e Indata), generar el conjunto de datos para entrenar y para prueba (Training_in, Training_target, Test set); entrenar la neurona.
3. Entrenar la red por medio de la herramienta NNTOOL de MATLAB, jugando con los números de capas ocultas y capa de salida que usa la red neuronal.
4. Generar un gráfico de rendimiento del comportamiento de la red neuronal.
5. Exportar los resultados de salida del entrenamiento de la red neuronal, se hace una comprobación para realizar un análisis de entrenamiento; se ejecuta un script *bandaancho.m*, para comprobar el número de aciertos de la red neuronal.
6. Realizar una tabla de resultados.

3.2 Toma de datos (Data Set) para entrenamiento

Un sistema de telecomunicaciones (Figura 2) cuenta con una fuente que genera datos a transmitir, el transmisor (Tx), los datos generados por la fuente no se transmiten directamente como se generan. El transmisor transforma y codifica la información produciendo señales electromagnéticas susceptibles de ser transmitidas a través de algún sistema transmisión. El sistema de transmisión puede ir desde una simple línea de (Tx) hasta una compleja red que conecta la fuente al destino. El receptor (Rx) acepta la señal proveniente del sistema de transmisión y lo convierte de tal manera que puede ser manejada por el dispositivo destino, el cual toma los datos del receptor.

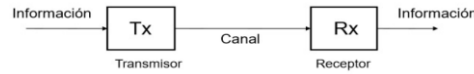


Figura 2. Sistema de telecomunicaciones

Se realiza la captura de datos para evaluar el consumo de ancho de banda entre dos hosts ubicados en una misma red inalámbrica (Tx) y (Rx). Los datos capturados (toma parcial) utilizando como unidad de medida el Byte/segundo (Figura 3).

Local_Host	Remote_Host	Timestamp	Protocol	Tx_1k	Tx_2k	Tx_4k	Tx_8k	Tx_16k	Tx_32k	Rx_1k	Rx_2k	Rx_4k	Rx_8k	Rx_16k	Rx_32k	Tx_AVG	Rx_AVG	Ping_AVG
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 5:	TCP	2893853	2522306	2533079	2218913	2178965	2504798	1629985	1898709	1803900	1640186	1823669	2191661	2475319	1831685	0
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 5:	TCP	3636870	3265307	3543792	3509547	3433869	3598513	1637141	1816770	2112366	1947957	1939251	2315877	3497983	1961560	15
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 5:	TCP	2972611	3410211	3511621	3539050	3413794	3582951	2007322	2132116	2276831	2264319	2534960	2616723	3405040	2305378	12
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 6:	TCP	3403013	3256248	3477638	3334737	3397434	3593841	1724875	2077893	2257700	2354697	2424938	2331959	3410485	2195344	12
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 6:	TCP	3387810	3036984	3215906	3458700	3310217	3785568	1806280	1806923	2037349	2106580	2137191	2307736	3349198	2033676	8
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 6:	TCP	2977076	3122078	3073054	2629692	1848684	2683184	1782058	1863317	2152111	1904919	1925166	2181374	2722295	1968158	12
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 6:	TCP	3310738	3223980	3577314	3329590	3585388	3185450	1865863	1945770	2260997	2053856	2481517	2476625	3368743	2180771	13
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 6:	TCP	3520536	3133131	3441795	3794911	3190341	3284415	2101028	2175500	2180254	2401376	2526153	2555731	3394188	2323340	10
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 6:	TCP	3216939	3354150	3476176	3589671	3325508	3398365	1995450	2076690	2642134	2332343	2537912	2737407	3393468	2386989	11
192.168.10.1	192.168.10.1	3/14/2019 6:	TCP	3446220	3275182	1795132	3252475	3002640	3241295	2031004	2181930	2459357	2374981	2260684	2432420	3002157	2290063	8

Figura 3. Data Set original capturada con NetIO-GUI

El software utilizado para la captura de datos es NetIO-GUI, el cual en un extremo se activa como servidor por el puerto 18767; y en el otro extremo como cliente direccionándolo al servidor. El cliente transmite (Tx) por el puerto TCP paquetes con un tamaño de 1, 2, 4, 8, 16 y 32 Kilobyte; y mide el ancho de banda utilizado para cada paquete enviado, también mide el mismo tipo de paquete como recibido (Rx). Al final de cada toma, tanto para (Tx), como (Rx) se genera un valor promedio.

Para preparar la data set se toman todas las columnas Tx, Rx, Tx_AVG y Rx_AVG, los datos se convierten a megabytes por segundo; se suman Tx_AVG y Rx_AVG para calcular el ancho de banda total promedio; al realizar esta comprobación se verifica que el ancho de banda se encuentra de 4 MB/seg hasta 8 MB/seg aproximado. Se agrega una columna que limita 4 y 8 MB/seg, y se divide por el valor mínimo de 4, se tiene como referencia 1 para 4 MB/seg y 2 para 8 MB/seg, generando el resultado (Figura 4).

Tx_1k	Tx_2k	Tx_4k	Tx_8k	Tx_16k	Tx_32k	Rx_1k	Rx_2k	Rx_4k	Rx_8k	Rx_16k	Rx_32k	Tx_AVG	Rx_AVG	Ancho Banda	4MB(1) y 8MB(2)
2,8939	2,5223	2,5331	2,2189	2,179	2,5048	1,63	1,8987	1,8059	1,6402	1,8237	2,1917	2,4753	1,8317	4,667	1
3,6369	3,2653	3,5438	3,5095	3,4339	3,5985	1,6371	1,8168	2,1124	1,948	1,9393	2,3159	3,498	1,9616	5,8139	1
2,9726	3,4102	3,5116	3,5391	3,4138	3,583	2,0073	2,1321	2,2768	2,2643	2,535	2,6167	3,405	2,3054	6,0217	1
3,403	3,2562	3,4776	3,3347	3,3974	3,5938	1,7249	2,0779	2,2577	2,3547	2,4249	2,332	3,4105	2,1953	5,7425	1
3,2878	3,037	3,2159	3,4587	3,3102	3,7856	1,8063	1,8069	2,0373	2,1066	2,1372	2,3077	3,3492	2,0337	5,6569	1
2,9771	3,1221	3,0731	2,6297	1,8487	2,6832	1,7821	1,8633	2,1521	1,9049	1,9252	2,1814	2,7223	1,9682	4,9037	1
3,3107	3,224	3,5773	3,3296	3,5854	3,1855	1,8659	1,9458	2,261	2,0539	2,4815	2,4766	3,3687	2,1808	5,8453	1
3,5205	3,1331	3,4418	3,7949	3,1903	3,2844	2,101	2,1755	2,1803	2,4014	2,5262	2,5557	3,3942	2,3233	5,9499	1
3,2169	3,3542	3,4762	3,5897	3,3255	3,3984	1,9955	2,0767	2,6421	2,3323	2,5379	2,7374	3,3935	2,387	6,1309	1
3,4462	3,2752	1,7951	3,2525	3,0026	3,2413	2,031	2,1819	2,4594	2,375	2,2607	2,4324	3,0022	2,2901	5,4346	1
2,6826	3,1219	3,5828	3,4927	3,6212	3,6809	1,9513	1,9951	2,1879	2,5218	2,4721	2,424	3,3637	2,2587	5,7877	1
3,7643	2,881	3,315	3,5265	3,5854	3,4534	2,0681	1,9238	2,1749	2,3442	2,2003	2,3699	3,4209	2,1802	5,7908	1
2,9675	3,367	3,0007	3,4361	3,1711	3,2817	2,0429	1,6937	2,1288	2,3966	2,3501	2,5463	3,204	2,1931	5,7503	1
3,6403	3,1665	3,4623	3,4545	3,3718	3,2812	2,1889	2,1591	2,463	2,4756	2,1672	2,5251	3,3961	2,3298	5,9212	1
3,4119	3,3423	3,4912	3,2541	3,3985	3,387	2,0827	2,2381	2,499	2,5916	2,3798	2,5037	3,3808	2,3825	5,8845	1
3,607	3,4962	3,8036	3,6517	3,7849	3,7045	1,9322	2,0254	2,3529	2,6622	2,514	2,7142	3,6746	2,3668	6,3888	2
3,5517	3,2062	3,5006	3,8809	3,7797	3,813	1,8593	1,8625	2,3201	2,4254	2,5699	2,81	3,622	2,3079	6,432	1
3,2309	2,9278	3,0577	3,3772	3,5991	4,4012	2,1811	2,3066	2,641	2,7298	4,222	4,5073	3,489	3,098	7,9963	2
4,1865	3,7166	4,2086	3,8738	4,1963	3,8036	3,6562	3,739	4,2465	4,0191	4,0958	3,7474	3,9976	3,9173	7,745	2
4,3918	4,4606	4,7047	4,369	4,2738	3,7729	3,6531	3,7171	4,1496	4,2389	4,2234	3,9821	4,3288	3,994	8,3109	2
4,0774	4,6355	4,5141	4,9414	4,3789	4,6126	3,6042	3,5479	4,3669	4,2466	4,3723	3,7683	4,5267	3,9844	8,295	2
4,7137	4,7118	4,6606	4,5238	4,4122	4,6765	3,5075	3,7802	4,1984	4,1395	4,0925	4,4231	4,6164	4,0235	9,0395	2
4,2939	4,2311	4,4226	4,1657	4,3435	4,0992	3,4414	3,0089	4,0568	4,2904	3,9383	3,6461	4,2593	3,7303	7,9054	2
5	4,5333	4,7288	4,795	4,6764	4,8703	3,4831	3,2087	4,2756	4,2331	4,0029	4,1266	4,8373	3,8884	8,9639	2

Figura 4. Data Set final para la red neuronal

Se elimina la fila de las etiquetas y la columna de ancho de banda, para generar la data set final, que se exporta como formato (.csv).

3.3 Preparar los datos por medio de MATLAB con un script

```

Nombre del script "bandaancho.m"
%
%_Universitaria Agustiniana_
%_Redes Neuronales_
  
```

```

%Borramos las comillas y no usamos ni la primera ni la última columna
%Lectura de los datos
bwdata=csvread('anchob.csv',0,0);
size(bwdata)
bwdata=bwdata';
size(bwdata)

%Etiquetas de los datos
target=bwdata(15,:);
% Los datos
indata=bwdata(1:14,:);
%Generar los conjuntos de entrenamiento y prueba
training_in = indata(:,1:2:length(indata));
testset_P = indata(:,2:2:length(indata));
training_target = target(1:2:length(target));
testset_T = target(2:2:length(target));

%USAR nntool y comenzar a jugar con la red
%Usando los conjuntos con 2 clases: 0 y 1
%entrenamiento
red3_salida=red3_salida>1.5;
unos= ones(1,107);
red3_salida=red3_salida+unos;
[cantidad,posicion]=find(training_target==red3_salida);

%prueba
red3_salida=red3_salida>1.5;
unos= ones(1,106);
red3_salida=red3_salida+unos;
[cantidad2, posicion2]=find(testset_T==red3_salida);

```

Los resultados del script (Figura 5) son el conjunto de datos para entrenar y prueba (ans, bwdata, indata, target, testset_P, testset_T, training_in, training_target).



Figura 5. Conjunto de datos para entrenar y prueba

3.4 Entrenar la red neuronal con NNTOOL de MATLAB

Se entrena la red, jugando con los números de capas ocultas y capa de salida que usa la red neuronal (Tabla 1).

Tabla 1. Número de redes neuronales y capas

Red neuronal	Valores de neuronas	Capas
1	10, 10, 1	3
2	12, 12, 12, 1	4
3	14, 14, 10, 1	4
4	8, 7, 5, 1	4
5	8, 7, 1	3
6	8, 7, 5, 10, 1	5
7	8, 8, 8, 1	4

Se tomará como ejemplo de la red neuronal 1, para observar el comportamiento del entrenamiento (Figura 6) de cada una de las redes neuronales construidas. Se escoge una arquitectura, luego se seleccionan sus valores de propiedad. Si la red tiene un número variable de capas, puede ver y editar las propiedades de una capa seleccionando esa capa del menú emergente proporcionado. Se crea la red entrenamiento (Figura 7) con el algoritmo Levenberg-Marquardt.

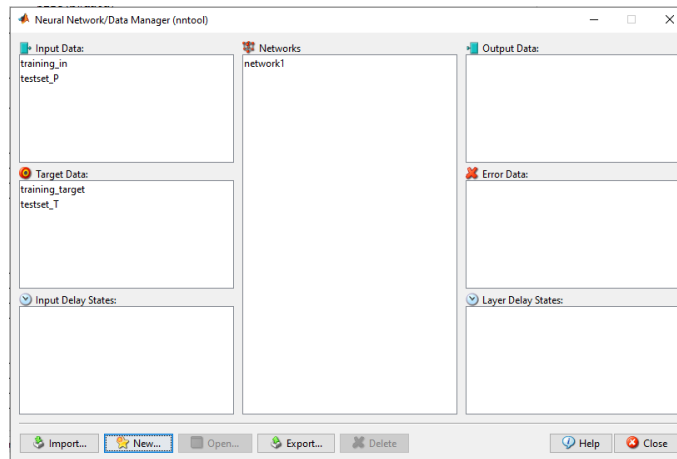


Figura 6. Herramienta NNTOOL

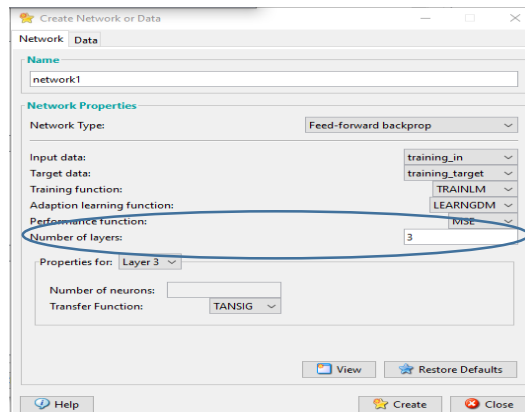


Figura 7. Crear la red neuronal, algoritmo entrenamiento

Se visualiza la topología de red neuronal (Figura 8) seleccionada mediante el software de simulación.

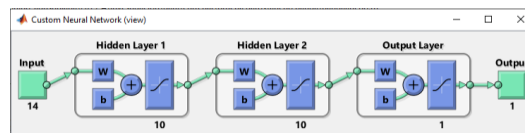


Figura 8. Topología red neuronal

Se agregan las matrices de entrenamiento (Figura 9), como son los datos de entrada Training_in y los datos de salida Training_target, el nombre para los resultados de entrenamiento son salida red3_salida y errores network1_errors. Se finaliza el entrenamiento de la red neuronal (Figura 10), con los parámetros seleccionados.

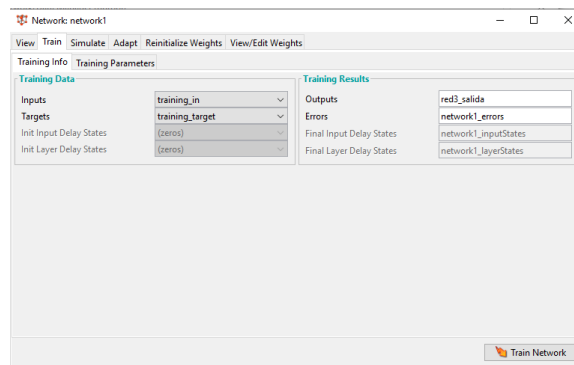


Figura 9. Data de entrenamiento

3.5 Gráficos de rendimiento del comportamiento de la red neuronal

Para mostrar el rendimiento de la red neuronal durante el entrenamiento (Figura 11) se usa `plotperform(tr)`, mostrando cada uno de los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba. Se puede observar cómo usar `plotperform(tr)` para obtener un gráfico de valores de error de registro de entrenamiento contra el número de épocas de entrenamiento. En general, el error se reduce después de más épocas de entrenamiento, pero podría comenzar a

aumentar en el conjunto de datos de validación a medida que la red comienza a sobrecalentar los datos de entrenamiento. En la configuración predeterminada, el entrenamiento se detiene después de seis aumentos consecutivos en el error de validación, y el mejor rendimiento se toma de la época con el error de validación más bajo.

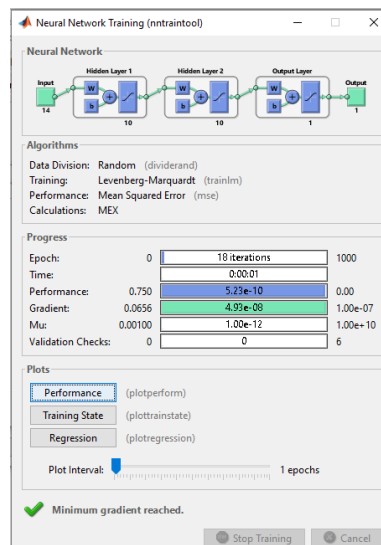


Figura 10. Entrenamiento de la red neuronal

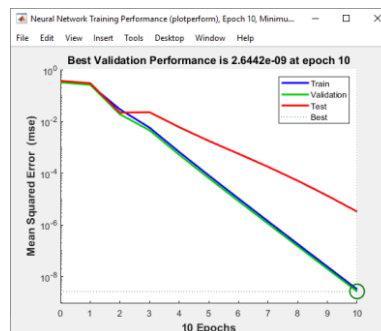


Figura 11. Gráfico del rendimiento de entrenamiento

La traza del estado de entrenamiento (Figura 12) a partir de un registro de entrenamiento, `plottrainstate(tr)`, muestra algunas otras estadísticas de entrenamiento. Gradiente es un valor de gradiente de propagación hacia atrás en cada iteración en escala logarítmica $5e-7$, significa que llegó al final del mínimo local de su función objetivo. La validación falla cuando el número de iteraciones incrementan el valor del MSE. Una gran cantidad de fallos significa sobreentrenamiento (del inglés *overtrainig*), pero en su caso está bien. MATLAB detiene automáticamente el entrenamiento después de seis fallos seguidas.

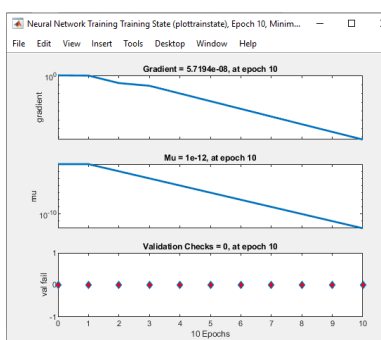


Figura 12. Gráfico del Estado de entrenamiento

El siguiente paso para validar la red es crear un gráfico de regresión (Figura 13), que muestre la relación entre las salidas de la red y los objetivos. Si el entrenamiento fuera perfecto, los resultados de la red y los objetivos serían exactamente iguales, pero la relación rara vez es perfecta en la práctica. El gráfico final crea tres gráficos de regresión para entrenamiento, pruebas y validación. La línea discontinua en cada gráfico representa el resultado perfecto: salidas = objetivos. La línea continua representa la mejor línea de regresión lineal de ajuste entre salidas y objetivos. El valor R es una indicación de la relación entre las salidas y los objetivos. Si $R = 1$, indica que existe una relación lineal exacta entre las salidas y los objetivos. Si R está cerca de cero, entonces no hay una relación lineal entre las salidas y los objetivos.

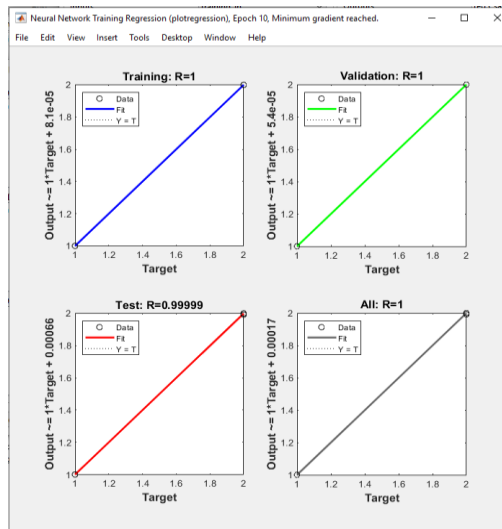


Figura 13. Gráfico regresión de entrenamiento

3.6 Resultados de salida del entrenamiento de la red neuronal

Se presentan los resultados iniciales de la predicción realizada (Figura 14). Datos de salida en la simulación Red 3.

	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
1	1,0003	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	1,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
2																									
3																									
4																									

Figura 14. Valores binarios, una matriz de unos

La tabla de Red 3 de salida se pasa a valores binarios (Figura 15) una matriz de unos, es necesario tomar estos valores para generar una relación para las conclusiones, debido a que se tienen datos, menores que 1 y hasta 1.

```
red3_salida=red3_salida>1.5;
unos= ones(1,107);
red3_salida=red3_salida+unos;
```

	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
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2																									
3																									
4																									

Figura 15. Variable clasificación del ancho de banda

Para los datos de salida como se explicó anteriormente se tienen datos 1 y 2 para el atributo de la variable clasificación del ancho de banda. Ahora se genera el análisis de entrenamiento; se ejecuta el siguiente comando para comprobar el número de aciertos tanto en cantidad, como de posición de la red neuronal.

```
[cantidad,posicion]=find(training_target==red3_salida);
```

Ejemplo: se acertaron 105 posiciones
posición =

Columns 1 through 23

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23

Columns 24 through 46

24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46

Columns 47 through 69

47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69

Columns 70 through 92

70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93

Columns 93 through 105

94 95 96 97 98 100 101 102 103 104 105 106 107

3.7 Tabla de resultados

De acuerdo con lo anterior y después de realizar siete experimentos con el modelado en MATLAB (Tabla 2), se puede concluir que la red neuronal No 6, fue la que tuvo un valor más alto de porcentaje de exactitud en 99.06; con una configuración de cinco capas y una distribución de neuronas (8, 7, 5, 10, 1). Este resultado determina que a medida que se aumentan las neuronas en las capas, el valor de porcentaje tiende a bajar, ahora los experimentos No. 2 y No. 7 siguen como mejor exactitud en las pruebas finales para un valor de porcentaje de exactitud de 98.58 con una configuración de cuatro capas, pero 12 neuronas y ocho neuronas en la segunda capa. Se deduce que la data set analizada es el modelo futuro de *machine learning*, el cual puede tener muchas aplicaciones. Sin embargo, se deba anotar que pese a los esfuerzos por obtener un modelo cercano a la realidad del fenómeno son muchos datos que se deben tener en cuenta. Las redes neuronales artificiales representan una excelente alternativa como método de predicción para series temporales.

Las redes neuronales alcanzan cada vez mayor auge, teniendo multitud de aplicaciones en campos diversos y dando soluciones sencillas a problemas cuya resolución resulta complicada cuando se emplean máquinas algorítmicas. Al aplicar las redes neuronales no está forzado a hacer un análisis a priori de la serie de tiempo y de sus implicaciones, esto se convierte finalmente en la capacidad de hacer predicciones con precisiones aceptables obviando hasta cierto punto la teoría de predicciones convencional.

Al definir la topología de la red neuronal, se debe tener cuidado en no sobre parametrizar la red; ya que, aun cuando el error de ajuste dentro del conjunto de datos de entrenamiento tiende a reducirse a cero, el poder de extrapolación de la red se reduce significativamente para datos fuera del conjunto de entrenamiento. Si se trabaja con una serie de tiempo con algún periodo cíclico es necesario absorber esta información en la red neuronal ajustando el número de neuronas de entrada correspondientes a los periodos anteriores al valor a predecir. Una vez definida una topología de red que se ajusta bien a la serie, el conjunto de datos de entrenamiento puede ser manipulado de diferentes maneras, obteniendo así diferentes resultados.

Tabla 2. Resultados finales del entrenamiento

Red neuronal	Valores de neuronas	Capas	Entrenamiento (107)	Prueba (106)	Porcentaje de asertivo (%)
1	10, 10, 1	3	105	104	98.12
2	12, 12, 12, 1	4	106	103	98.58
3	14, 14, 10, 1	4	104	104	97.65
4	8, 7, 5, 1	4	102	105	97.19
5	8, 7, 1	3	102	106	97.66
6	8, 7, 5, 10, 1	5	106	105	99.06
7	8, 8, 8, 1	4	106	104	98.58

3.8 Resultados de la predicción del tráfico de una red inalámbrica

Al realizar el entrenamiento de una red neuronal mediante el algoritmo Levenberg-Marquardt, se verificó la predicción del tráfico de la red inalámbrica en una pyme según el comportamiento de la red esperado, tendiendo el valor del error MSE a cero y con un alto porcentaje de exactitud, como se constató con las herramientas de MALTLAB.

4. CONCLUSIONES

Con la metodología propuesta, se realizó la predicción del consumo del ancho de banda de una red inalámbrica con un porcentaje de asertividad del 99.06%. Para el análisis de los datos se varió el número de neuronas y de capas, realizando siete experimentos para lograr el mejor resultado. Lo datos tomados fueron reales sobre una red inalámbrica.

Si se realiza un estudio de predicción de forma diaria en la red inalámbrica, se puede tener información eficaz para la toma de decisiones en la planificación de la red y la optimización de los recursos informáticos.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la metodología propuesta, se puede determinar un modelo de predicción de tráfico de red para la construcción de un software libre; el cual simulará el uso del consumo de ancho de banda, para presentar alertas que indiquen cuantos usuarios sobrepasan el límite del consumo por aplicación.

REFERENCIAS

- [1] A. Torija, D. Ruiz & Á. Ramos-Ridao. "Modelo basado en redes neuronales para predecir la estructura temporal y espectral de paisajes sonoros urbanos". *Revista de acústica*, vol. 41, no 1, pp. 5-17, 2010.
- [2] P. McCluskey, "Feedforward and recurrent neural networks and genetic programs for stock market and time series forecasting", Master of Science, Brown University, 1993.
- [3] N. Piedra, J. Chicaiza, J. López and J. Garcia, "Study of the Application of Neural Networks in Internet Traffic Engineering", *Hdl.handle.net*, 2008. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10525/1028>. [Accessed: 01- May- 2019].

- [4] V. Ribeiro, R. Goldschmidt & R. Choren, "Métodos para previsão de séries temporais e suas tendências de desenvolvimento". *Monografias em Sistemas e Computação*, vol. 3, pp. 1-26, 2009.
- [5] M. Papadopouli, H. Shen, E. Raftopoulos, M. Ploumidis & F. Hernandez-Campos, "Short-term traffic forecasting in a campus-wide wireless network." *2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 3, pp. 1446-1452, 2005.
- [6] S. Chabaa, A. Zeroual and J. Antari, "Identification and prediction of internet traffic using artificial neural networks". *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, vol. 2, no 03, pp. 147, 2010.
- [7] M. Hagan, H. Demuth, M. Beale and O. De Jesús, "Neural network design", vol. 20. Boston: Pws Pub., 1996.
- [8] B.M. Wilamowski, S. Iplikci, O. Kaynak and M.O. Efe B, "An algorithm for fast convergence in training neural networks." IJCNN'01. International Joint Conference on Neural Networks. Proceedings (Cat. No. 01CH37222), vol. 3, 2001.

En las cátedras de tesis de las Carreras de Informática de la Universidad de Morón, se observa que el mayor inconveniente que presentan los alumnos, al comienzo de la materia, es la definición del área de trabajo hacia donde orientarán la tesis. Esto ocasiona un retraso en la finalización de sus estudios y en algunos casos hasta el abandono de la carrera. En esta comunicación se presenta el progreso realizado para determinar características observadas en los alumnos, al comenzar la materia, y su relación con las áreas de investigación seleccionadas para el desarrollo de sus tesis de grado. En primera instancia se realizó un mapeo sistemático sobre las publicaciones realizadas en: el uso de la minería de datos para resolver problemas en el contexto de la Educación Superior, los tipos de problemas que se resuelven, las metodologías o procesos más empleados y las herramientas o lenguajes de programación utilizados. Sobre este estudio se presenta una síntesis. El mismo permitió tomar un conjunto de decisiones para el desarrollo de la investigación. El segundo estadio de la indagación consistió en el diseño de un instrumento de recolección de datos (cuestionario), obteniendo una muestra que, aunque escasa, permitió al grupo de trabajo lograr los primeros hallazgos respecto a los perfiles de los tesis. Par finalizar, se trabajó con el proceso Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos (Knowledge Discovery in Databases KDD). Las herramientas utilizadas fueron WEKA, RapidMiner y Elvira. Los algoritmos con los cuales se experimentó fueron árboles de decisión y redes bayesianas. Se obtuvieron así, las primeras aproximaciones de los perfiles de los tesis, las áreas de investigación más seleccionadas por los mismos y su relación con otras variables que los definen.

1. INTRODUCCIÓN

Ayala [1] plantea que la “*Minería de Datos Educativa (EDM) está viviendo su período adolescente, ya que su comienzo data del siglo XX, pero es a partir de este siglo que ya tiene sus Workshops dedicados, conferencias internacionales y una revista especializada*”. En [1] y [2] se relata cómo se puede utilizar la minería de datos en los entornos educativos”. Algunos trabajos han permitido descubrir perfiles de comportamiento en estudiantes en entornos de aprendizaje a distancia.

En [1] y [3] se presenta que la disciplina EDM emerge como un paradigma orientado a diseñar modelos, tareas, métodos y algoritmos con el objetivo de explorar los datos del entorno educativo. En [1] se describen los avances realizados por autores en EDM referidos a encontrar patrones y a realizar predicciones para caracterizar el comportamiento de los estudiantes y sus logros, o sus conocimientos sobre los contenidos, para detectar estudiantes en riesgo de abandono, o para predecir su rendimiento, entre muchos otros.

Con el propósito de cotejar y sistematizar la evidencia empírica al aplicar minería de datos en el contexto educacional de Nivel Superior, se presenta el desarrollo de un Mapeo Sistemático de la Literatura (Systematic Mapping Studies SMS). Para este, se utilizó el proceso propuesto en [4] y [5]. Este SMS permitió al grupo de investigación definir la metodología a utilizar en el proyecto de minería de datos, como así también la elección de las herramientas de trabajo. Se optó por emplear el proceso KDD [6] y como herramientas de trabajo WEKA [7], RapidMiner [8] y Elvira [19]. Para la construcción del instrumento de recolección de datos se tuvo en cuenta el procedimiento general propuesto en [9]. En este contexto, este capítulo presenta el desarrollo del SMS (sección 2.1.), la construcción del instrumento de recolección de datos (sección 2.2.), el desarrollo del proceso KDD (2.3.) y se formulan conclusiones y futuras líneas de trabajo (Sección 3).

2. DESARROLLO

2.1 Desarrollo del estudio de mapeo sistemático

En esta sección se presenta una síntesis de las actividades y resultados logrados a partir del desarrollo del SMS. Las actividades realizadas son: la planificación de la revisión (sección 2.1.1), su ejecución (2.1.2) y por último el reporte de la revisión (sección 2.1.3).

2.1.1 Planificación de la revisión

La Tabla 1 sintetiza las tareas realizadas en la Actividad de Planificación de la revisión.

¹ marisapanizzi@outlook.com

² iris.sattolo@gmail.com

³ lafontjavier@hotmail.com

⁴ nicolasarmilla@hotmail.com

Tabla 1. Planificación de la revisión

Tareas	Descripción	
Identificar la necesidad del estudio	Dado que en la Universidad se desarrolla un proyecto de investigación titulado: Aplicación de tecnologías inteligentes de explotación de información para el análisis de perfiles de tesis de grado de carreras informáticas de la UM; ha sido necesario la construcción del estado del arte respecto a la minería de datos educacional en el nivel de Educación Superior.	
Formular las preguntas de investigación (PI) y la motivación (MO)	PI1: ¿Qué se intenta resolver con EDM (Educational Data Mining)?	MO1: Descubrir que se resuelve con minería de datos en el contexto educacional
	PI2: ¿Qué metodologías se usan para aplicar minería de datos en instituciones de nivel superior?	MO2: Identificar las metodologías más utilizadas en las instituciones académicas de nivel superior.
	PI3: ¿Qué herramientas de trabajo y lenguajes de programación se utilizan para realizar minería de datos?	MO3: Descubrir las herramientas y lenguajes de programación más empleados.
	PI4: ¿Qué algoritmos se aplican?	MO4: Determinar qué algoritmos de minería de datos son los más utilizados para resolver problemas en educación de nivel superior.
Términos de investigación	T1: Minería de datos, T2: Data Mining, T3: Educación Superior, T4: Higher Education, T5: Minería de Datos Educacional, T6: Educational Data Mining	
Cadenas de búsqueda (C)	C1: Data Mining AND Higher Education, C2: Educational AND Data Mining, C3: Educational AND Data Mining AND Higher Education, C4: Minería de Datos AND Educación Superior Hay términos que se utilizarán como cadenas de búsqueda dado que con ellos se pueden encontrar estudios, estos casos son: Minería de Datos Educacional y Educational Data Mining.	
Criterios de selección de estudios	Criterios de inclusión: Ámbito: académico universitario; Período de búsqueda: a partir del 2008; Idioma: español e inglés. Artículos primarios Criterios de exclusión: Artículos que no estén accesibles para su lectura completa. Artículos que correspondan al entorno educativo, pero no universitario, por ejemplo, artículos que traten la educación primaria o secundaria.	
Fuentes de Datos	Publicaciones de congresos y revistas de: IEEE Explore, Springer, Dialnet, Scielo, European Union Digital Library, ScienceDirect, GoogleAcademic, SEDICI ¹ Dado que el proyecto de investigación se desarrolla en la República Argentina, el grupo de investigación decidió considerar las publicaciones del Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC), Congreso Argentino de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología (TE&ET), Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC) y la Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología (Revista TR&ET); estas actividades científicas son organizados por la RedUNCI ²	
Validación del protocolo	Esta actividad se llevó a cabo de manera conjunta con el resto de los investigadores del proyecto.	

2.1.2 Realización de la revisión

En la actividad Realización de la revisión, se seleccionaron los estudios considerando algunos criterios utilizados en [10]. La cantidad de artículos seleccionados se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Fuentes de búsqueda y trabajos seleccionados para cada etapa.

Fuentes de búsqueda	Artículos relevantes	Artículos no considerados	Artículos primarios
IEEE Explore	61	14	47
Springer	2	2	0
Dialnet	12	5	7
Scielo	3	2	1
European Union Digital Library	2	1	1
ScienceDirect	7	5	2
GoogleAcademic	65	17	48
SEDICI	8	2	6

El esquema de extracción se presenta en la Tabla 3. La cantidad de artículos encontrados han sido 160 (artículos relevantes), el total de artículos no considerados fueron 48 y la cantidad de artículos primarios resultaron un total de 112. Para determinar la calidad de los artículos se adhirió al criterio en el cual los estudios primarios deberán encontrarse publicados en revistas indexadas y en eventos científicos con revisión por pares [5].

2.1.3 Reporte de la revisión

Al analizar los datos extraídos de los artículos primarios se concluye que:

- Los problemas que se resuelven con la aplicación de procesos de minería de datos son de rendimiento académico en un primer lugar, con el objetivo de estudiar el desempeño de un estudiante universitario, ya sea durante en el transcurso o final de una carrera. En un segundo lugar, se aplica con el propósito de clasificar a los estudiantes y

¹ SEDICI: Repositorio digital de la Universidad Nacional de La Plata, en el cual se publica las Actas del Congreso Argentino de Ciencias de la Computación y del Congreso Argentino de Tecnología de la Educación y Educación en Tecnología, sitio: <http://sedici.unlp.edu.ar/>

² RedUNCI: Red de Universidades Nacionales con carreras en Informática, sitio: <http://reduinci.info.unlp.edu.ar/>

poder realizar un análisis sobre los distintos grupos por sus similitudes y diferencias entre ellos. En un tercer lugar, se utiliza para analizar políticas institucionales universitarias, a partir del conocimiento obtenido de la institución como herramienta para la toma de decisiones estratégicas.

- De las metodologías empleadas, se denota que el proceso KDD es el más utilizado y en segundo orden, CRISP-DM.
- De las herramientas y lenguajes de programación que se utilizan para minería de datos, la herramienta más utilizada es Weka. A continuación, RapidMiner y SPSS. En el grupo de los lenguajes de programación, se destaca el uso de Python para este tipo de proyecto.
- Del uso de los algoritmos para la construcción de los modelos, se denota un uso significativo de las redes bayesianas, en particular el modelo Naïve Bayes. De esto se deduce una fuerte tendencia hacia la construcción de modelos predictivos. En un segundo lugar, se observa el uso de algoritmos de clustering en general (sin especificar los algoritmos en particular). En un tercer lugar, se menciona el uso del algoritmo J4.8 y los árboles de decisión (sin especificar los algoritmos). El uso de algoritmos de clustering y de árboles de decisión muestran la tendencia hacia la construcción de modelos descriptivos también.

El reporte completo del establecimiento del estado del arte se encuentra en [11].

Tabla 3. Extracción de datos de los estudios primarios

Datos extraídos	
Dimensión	Categorías
Dimensión - Datos Generales	ID: identificador de registración del artículo, cadena de búsqueda, Año, Título, Autor(es), Fuente (Nombre del Congreso o Revista), Tipo de publicación (R=Revista, C=Congreso), Fuente de búsqueda, País, Palabras clave, Cita (APA), Cantidad. de citas, Problema, Propuesta, Resultados.
Dimensión - Metodologías	KDD- CRISP-DM SEMMA, No menciona
Dimensión - Contribución	Rendimiento académico, Comportamiento estudiantil, Deserción estudiantil, Análisis/Clasificación de perfiles, Calidad Educativa, Diferencias de género en postulantes universitarios, Empleabilidad estudiantil, Educación cooperativa, No menciona
Dimensión - Propósito:	Evaluar, Validar, Proponer una solución, Informar una experiencia, Comparar, Opinar
Dimensión - Algoritmos	En esta dimensión, se consideran los algoritmos para minería de datos (J48, ID3, K-means, etc.). Es importante aclarar que la inclusión de una categoría nueva en la dimensión se ha realizado en función de su aparición en los estudios relevantes.
Dimensión - Herramientas y lenguajes de programación	En esta dimensión, se consideran las herramientas y los lenguajes de programación utilizados para los procesos de minería de datos (WEKA, RapidMiner, Knime, Orange, Python, etc.). Es importante aclarar que la inclusión de una categoría nueva en la dimensión se ha realizado en función de su aparición en los estudios relevantes.

2.2 Construcción del instrumento de recolección de datos

Para la construcción de la herramienta de recolección de datos se tuvo en cuenta el procedimiento general de construcción de un instrumento de recolección de datos de Hernández Sampieri [9]. Al instrumento en cuestión, lo denominamos TESISTAS – UM. De la revisión y análisis del procedimiento, se realizó una adecuación de los pasos en función de las necesidades del presente trabajo; cuyo propósito era analizar los perfiles de los tesis-graduados de las carreras de grado de informática en la UM (Universidad de Morón) [12]. En la Tabla 4, se presentan las preguntas para la identificación de la variable y otras precisiones a considerar (TESISTAS-UM). A continuación, se presentan los dominios del contenido de la variable (dimensiones), los indicadores de cada dimensión, y la nomenclatura propuesta de las dimensiones. En la Tabla 5 se presenta la variable, sus dimensiones, la nomenclatura propuesta para cada dimensión y los indicadores.

Tabla 4. Preguntas para la identificación de la variable y otras precisiones

Preguntas	Respuestas
¿Qué se va a medir?	Variable: perfil de tesis de carreras de informática en la UM
¿Qué o quiénes va a ser medidos?	Graduados de las carreras Licenciatura e Ingeniería de la FICCTE
¿Cuándo?	Graduados: alumnos que finalizaron sus trabajos de tesis
¿Dónde?	En la Universidad de Morón
¿Qué tipo de datos queremos obtener?	Perfil del tesis-graduado
¿Nuestro propósito al recolectar los datos es?	Identificar patrones de comportamiento de los tesis de las carreras de informática de la UM.

Tabla 5. Variable, sus dimensiones, la nomenclatura propuesta para cada dimensión y los indicadores

Variable	Dimensión	Nomenclatura de la Dimensión	Indicador
Perfil del tesis de carreras de informática de la UM	Académica	ACA	Permanencia del alumno en la carrera
	Laboral	LAB	Experticia laboral antes, durante y al finalizar el trabajo de tesis
	Personal	PER	Dedicación para el desarrollo de la tesis
	Tesis	TES	Área de trabajo seleccionada para el desarrollo de la tesis

Para la construcción de los ítems y de las opciones de respuesta de las dimensiones, se planteó una tabla para cada una de las dimensiones. Resultando las Tablas 6, 7, 8 y 9 que se presentan a continuación.

Tabla 6. Dimensión Datos Académicos (ACA)

Dimensión	Ítems
Datos Académicos (ACA)	¿Nro. de Matricula?
	¿Apellido y Nombre?
	¿Carrera?
	¿Plan de estudios?
	¿En qué año inicio la carrera?
	¿Cuánto tiempo le llevó la realización de la carrera?

Tabla 7. Dimensión Datos Laborales (LAB)

Dimensión	Ítems	Opciones de Respuesta
Datos Laborales (LAB)	Al inicio de su tesis, trabajaba en sistemas	- Sí - No - Infraestructura. - Seguridad informática. - Redes. - Sistemas operativos.
	Si trabajaba en sistemas: ¿En qué área o áreas se desempeñaba?	- Base de datos y Minería de datos. - Análisis funcional y requerimientos. - Desarrollo. - Testing. - Procesos de negocio. - Varias
	Una vez finalizada su tesis: ¿Modificó su condición laboral?	- Cambió de trabajo. - Cambió de área. - No cambió.

Tabla 8. Dimensión Datos Personales (PER)

Dimensión	Ítems	Opciones de Respuesta
Datos personales (PER)	¿Cuál era su edad en el momento que realizó su tesis?	- Menos de 25 años.
		- Entre 25 y 30 años.
		- Entre 31 y 35 años.
		- Más de 35 años.
	¿Cómo se componía su Grupo familiar en el momento que desarrolló su tesis?	- Vivía con sus padres.
		- Vivía solo. - Vivía con amigos. - Vivía en pareja o casado. - Tenía hijos.

Tabla 9. Dimensión Datos Tesis (TES)

Dimensión	Ítems	Opciones de Respuesta	
Datos tesis (TES)	Título de la tesis - Palabras clave	-Agentes y Sistemas Inteligentes. -Procesamiento Distribuido y Paralelo. -Tecnología Informática aplicada en Educación -Computación Gráfica, Imágenes y Visualización. -Ingeniería de Software.	
	¿En qué área de trabajo desarrollo su tesis?	-Bases de Datos y Minería de Datos. -Arquitectura, Redes y Sistemas Operativos. -Innovación en Sistemas de Software. -Procesamiento de Señales y Sistemas de Tiempo Real. -Seguridad Informática. -Innovación en Educación en Informática.	
	¿Cuál fue el motivo de selección de su tema de tesis?	-Interés personal. -Propuesta de la cátedra. -Líneas de investigación. -Vinculación con su trabajo. -Otro.	
		De su trabajo de tesis, ¿surgió alguna publicación?	-Si -No

Algunas de las respuestas de esta dimensión fueron resueltas mediante la utilización del sistema de gestión académica de la Universidad de Morón para no fatigar al encuestado con preguntas innecesarias, como, por ejemplo: año de inicio de la carrera, permanencia en la carrera. La respuesta a la pregunta plan de estudios se incluyó en el cuestionario, pero dado que los graduados muchas veces no recuerdan este dato fue verificado en el sistema de gestión académica.

Para la definición de las áreas de trabajo, se consideraron las áreas de investigación propuestas en el Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC), el cual es organizado por la Red de Universidades Nacionales con

Carreras en Informática (RedUNCI) cubriendo temas de importancia en Ciencias de la Computación. El instrumento de recolección resultante se lo sometió a prueba para evaluar las condiciones de aplicación como así también los procedimientos involucrados. Además, se comprobó si las instrucciones/preguntas eran comprendidas por el graduado (encuestado) y si los ítems funcionaban de manera adecuada. La prueba contempló dos instancias: una prueba piloto inicial y una prueba piloto de campo.

En la prueba piloto inicial se seleccionó un graduado de cada carrera se suministró el cuestionario con el objetivo de aplicar la estrategia de validación de caso único. Esta prueba permitió evaluar el lenguaje y la redacción utilizada en el instrumento, como resultado de esta se han realizado algunas modificaciones en algunas preguntas vinculadas a las áreas de trabajo de los graduados, en las áreas de catalogación de los trabajos de tesis y se obtuvo una segunda versión del instrumento de recolección de datos. Esta prueba se desarrolló de manera manual.

Para probar la confiabilidad inicial del instrumento de recolección, se realizó una prueba piloto de campo con un número reducido de graduados (20 graduados) y después de un mes, se volvió a enviar el cuestionario, empleando el método de estabilidad (test – retest); que permitió comparar los resultados de las primeras respuestas y de las segundas, resultando similitud entre los valores de respuesta. Esta prueba se desarrolló a través del envío del cuestionario de manera digital

2.3 Aplicación del proceso KDD

En la actualidad, las cátedras de tesis poseen una planilla de cálculo que contiene la información sobre las tesis defendidas de los alumnos. Esta información se compone de los datos del alumno (apellido, nombre, matrícula y carrera), fecha de defensa de la tesis, docente-tutor o docente-director del trabajo, título del trabajo, línea de investigación a la que corresponde el trabajo, resumen, objetivos y futuros trabajos. Este archivo permitió a las cátedras llevar un registro sistemático de un total de 290 tesis, desde el año 2005 hasta el mes de marzo del 2018. A partir de dichos datos, se recolectó un total de 178 encuestas que se utilizaron para el desarrollo del proceso de “descubrimiento de conocimiento en bases de datos” (en inglés, Knowledge Discovery in Databases, KDD) considerado como “el proceso no trivial de identificar patrones válidos, novedosos, potencialmente útiles y, en última instancia, comprensibles a partir de los datos” [13]. Este proceso comprende diversas etapas, presentadas en la Figura 1, que van desde la obtención de los datos hasta la aplicación del conocimiento adquirido en la toma de decisiones. Entre esas etapas, se encuentra la que se considera como el núcleo del proceso KDD y que se denomina Minería de Datos (en inglés, Data Mining) [6].



Figura 1 Fases del proceso KDD [12]

2.3.1 Fase de integración y recopilación de datos

En esta fase, se determinan las fuentes de información que puedan ser útiles para el trabajo. En este trabajo, se utilizó la planilla de cálculo de la cátedra y el instrumento de recolección de datos construido (TESISTAS – UM).

2.3.2 Fase de selección, limpieza y transformación

En esta fase, se detectaron valores erróneos o faltantes, corrigiendo los datos incorrectos y decidiendo sobre las estrategias que se aplicaron sobre los datos incompletos. Se proyectaron los atributos o valores para considerar aquellos que sean relevantes y hacer más fácil la tarea de minería de datos. A estas dos primeras fases también se las suele englobar con el nombre de “preparación de los datos”. Del instrumento construido, se consideraron los ítems que se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. ítems considerados para el procesamiento de datos

Dimensión	Ítems
ACA	Carrera
	Nombre
LAB	Al iniciar la tesis, trabajaba en sistemas
	Una vez finalizada su tesis: ¿Modificó su condición laboral?
PER	Edad al comienzo de la tesis
	Composición grupo familiar
	Área de trabajo de su tesis
TES	Motivo
	Publicación

Del ítem “nombre” se obtuvo el atributo derivado SEXO, con el propósito de un análisis más exhaustivo en relación con la elección de áreas de investigación y género. En el ítem “plan de estudio”, se encontró que varios graduados dejaron el campo en blanco. En una primera instancia, se decidió no usar este atributo. Esto se debe a que los encuestados no recuerdan este dato. Esta información se planifica recuperar del sistema gestión académica de la Universidad para otra instancia del análisis.

Detección de características relevantes. La selección de características o atributos es una técnica necesaria en el pre-procesamiento cuando se desea realizar tareas de minería de datos. Los algoritmos de selección de características tienen dos objetivos principales:

- Reducir el costo computacional asociado tanto al aprendizaje como al propio modelo de conocimiento generado (eliminando atributos irrelevantes o redundantes).
- Aumentar la precisión de dicho modelo (eliminando atributos perjudiciales para el aprendizaje) [6].

En general, las técnicas de selección de atributos pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Técnicas de filtrado. Evalúan los atributos de acuerdo con heurísticas basadas en características generales de los datos e independientes del algoritmo de aprendizaje.
- Técnicas envolventes. Trabajan juntamente con el algoritmo que va a usarse para el aprendizaje para determinar que atributos son más relevantes.

En esta fase se utilizó el entorno de desarrollo WEKA [7]. Se probaron los siguientes evaluadores:

- CFS (*CfsSubsetEval*) y CSE (*ConsistencySubsetEval*), como métodos de filtrado, los cuales eligen un subconjunto de atributos.
- *ReliefAttributeEval*, mira el k-vecino más cercano y el k-enemigo más cercano y pondera los atributos mediante una fórmula (la cual depende de la versión del algoritmo) con la cual construye un ranking.
- *WrapperSubsetEval*: Es un método envolvente probando el clasificador BayesNet con 5 padres.

En la Tabla 11, se presenta una comparación de los resultados obtenidos por los diferentes evaluadores. De acuerdo con los resultados obtenidos por los evaluadores utilizados en WEKA, se decidió seleccionar como atributos más relevantes a: Carrera, Área de trabajo, Grupo familiar y Edad, para la caracterización de los perfiles de los tesis de las carreras de Informática de la Universidad de Morón.

Tabla 11 Resultados al aplicar los evaluadores propuestos

Evaluadores	Modo de evaluación	Método	Evaluación de atributos
cfsSubSet Eval (filtro)	Cross- validation	Best first	Carrera 100% Área de trabajo 100 % sexo 50 % grupo familiar 60 %
ConsistencySubsetEval (filtro)	Cross- validation	GreedyStepwise	Carrera 100% Edad 100% Grupo Familiar 100% Área de trabajo 100% Motivo 100% Sexo 80 %
ReliefAttributeEval (filtro)	Cross validation	Ranker	Área de trabajo 0.138 Edad 0.057 Sexo 0.057 Carrera 0.046 Grupo-familiar 0.021
WrapperSubsetEval -B weka.classifiers.bayes. BayesNet 5 padres envoltura	Cross- validation	GreedyStepwise	Área de trabajo 90 % Grupo familiar 60 % carrera 20 % trabaja en sistemas 10%
WrapperSubsetEval -B weka.classifiers.bayes. BayesNet 5 padres envoltura	Cross validation	Best-first	Área de trabajo 90 % Grupo familiar 60 % Carrera 10 % Trabaja en sistemas 10%

Del análisis de datos recolectados se observó:

1. Que en el área de Computación Gráfica, Imágenes y Visualización había solamente dos tesis. Dada la escasa elección del área, estas tesis se reagruparon en el área de Innovación en Sistemas de Software por las temáticas abordadas en las mismas.

2. Los temas de tesis que pertenecían a las áreas Innovación en Educación en Informática y Tecnología Informática aplicada a la Educación se reagruparon en un área a la que se denominó Tecnología y Educación por tener las mismas incumbencias propuestas para el Congreso Nacional de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología (TE&ET), el cual es organizado por la Red de Universidades con Carreras en Informática (RedUNCI).
3. El atributo edad originalmente contaba con cuatro rangos (Menor de 25, de 25 a 30, de 31 a 35, Mayor de 35), se reagrupó considerando los siguientes rangos (Menores de 25 años, Entre 25 y 30 años, Mayores a 30 años) para lograr una distribución más balanceada.
4. En la recolección de datos, el atributo grupo familiar se definió con cuatro valores (vive-con-padres, solo, hijos y pareja), del análisis de este atributo se logró una reagrupación en dos valores (Con compromiso, Sin compromiso). Esta decisión se fundamenta en la dedicación que el tesista cuenta para con la tesis, el tesista que vive solo (sin hijos) o con sus padres tiene más tiempo respecto a los que son casados o viven en pareja y/o tienen hijos.

2.3.3 Fase de minería de datos

En esta fase, se decide cual será la tarea para realizar (clasificar, agrupar, etc.) y se elige el método que se va a utilizar. La Tabla 12, presenta los atributos a utilizar en la fase de DM con sus valores asociados luego de la transformación y limpieza de los datos.

Tabla 12. Atributos y valores para ser utilizados en la fase de Minería de Datos

Atributos	Valores
Área de tesis	Agentes y sistemas inteligentes/ Ingeniería de Software/ Base de Datos y Minería de datos/ Innovación en Sistemas de Software/ Arquitectura, Redes y Sistemas Operativos/ Seguridad Informática/ Tecnología y Educación/ Procesamiento de señales y sistemas en tiempo real
Carrera	Licenciatura en Sistemas/ Ingeniería en Informática
Área de trabajo	Análisis funcional y requerimientos/ Bases de datos y minería de datos/ Desarrollo/Infraestructura/ Procesos de negocio/ Seguridad informática/Testing/Varios/ No trabaja
Edad	Menores de 25 años/ Entre 25 y 30 años/ Mayores a 30 años
Grupo familiar	Con compromiso/ Sin compromiso

En esta fase se realizaron varias tareas de acuerdo con el problema planteado. En una primera etapa, se construyó un modelo preliminar de carácter descriptivo, en el cual su objetivo era describir los datos existentes, sin predecir nuevos datos [6]. Este modelo permitió identificar las áreas de investigación de las tesis seleccionadas por los tesistas y su relación con otros atributos que definen al mismo. Para la construcción del modelo, se trabajó con reglas de asociación [8] donde el atributo objetivo (área de tesis), se relacionó con los atributos carrera, edad, grupo familiar y área de trabajo. Se experimentó con los algoritmos de árboles de decisión: J4.8 de WEKA [9], ID3 en RapidMiner [10] y CART en Knime [11]. En el momento de esta fase se contaba con 114 muestras. En la última etapa, se planteó construir un modelo de carácter predictivo, para solucionar el problema de la incertidumbre, se aplicaron redes bayesianas, el algoritmo Naïve Bayes. En esta etapa, se trabajó con 178 muestras.

- *Análisis de los algoritmos de árboles de decisión.* Los árboles de decisión son una de las formas más sencillas de representación del conocimiento adquirido. Dentro de los sistemas basados en árboles de decisión, habitualmente denominados TDIDT (Top Down Induction of Decision Trees) [13], se pueden destacar dos familias o grupos: la familia ID3, el más representativo es el propio algoritmo ID3 propuesto por Quinlan [13] y la familia de árboles de regresión, cuyo exponente más significativo es Cart, desarrollado por Breiman et al. [14]. Los TDIDT se caracterizan por utilizar una estrategia de divide y vencerás descendente, es decir, partiendo de los descriptores hacia los ejemplos, dividen el conjunto de datos en subconjuntos siguiendo un determinado criterio de división. A medida que el algoritmo avanza, el árbol crece y los subconjuntos de ejemplos son menos numerosos [13].

Los algoritmos generan reglas de decisión que son presentadas como un árbol, donde la población total (nodo raíz) es sucesivamente dividida (ramas-nodos intermedios) hasta obtener segmentos de similar comportamiento (nodos hojas) en relación con la variable objetivo. Las hojas contienen la predicción. En cada división se selecciona al predictor que mejor separa la población con respecto a la variable objetivo. Si la variable objetivo es categórica, se llaman árboles de clasificación, en cambio, si es continua se llaman árboles de regresión [15], [16]. Los diversos algoritmos se diferencian por razones como: naturaleza de los datos a clasificar, número de ramas que pueden dividir, criterios utilizados para la división, administración de los valores faltantes y métodos de poda (simplificación del árbol).

CART genera solo árboles binarios, es decir de cada nodo se desprende exactamente dos ramas. Mientras que J4.8 e ID3 pueden generar más de dos ramas. Si el predictor es de tipo nominal, CART agrupa las categorías en dos y genera solo dos ramas. J4.8 e ID3 por defecto generan una rama por cada categoría, pero además presentan la opción de agrupar categorías para generar menos ramas. Si el predictor es de tipo continuo, CART, J4.8 e ID3 buscan un valor de división y generan solo dos ramas. Si el predictor es ordinal, se puede ingresar a los algoritmos CART, J4.8 e ID3 como si fueran continuos.

Para definir los criterios de división, se utilizan medidas de pureza para seleccionar los atributos que mejor dividen a las instancias. J4.8 e ID3 utilizan la medida de Razón de Ganancia por defecto (basado en entropía). En WEKA solo se dispone de esta medida, mientras que RapidMiner provee de Information-gain, Gain-ratio, Gini Index, Accuracy. CART utiliza el Índice de Gini por defecto.

Los Métodos de poda utilizados en los algoritmos son los siguientes; J4.8 e ID3 que cuentan por defecto con el método de Error Pesimista y dos etapas de poda: local y global. WEKA adicionalmente ofrece el método de Error Reducido. En WEKA se cuenta con la opción de ejecutar ambas etapas, mientras que en RapidMiner solo presenta la etapa local. CART tiene por defecto el método de Costo-Complejidad.

- *Experimentos realizados con tareas descriptivas*

- *Experimento 1.* Nuestra pregunta planteada fue: *¿qué diferencias existen entre los algoritmos J4.8, ID3 y CART?* Se utilizaron los algoritmos de árboles de decisión, J4.8 (en WEKA), ID3 (en RapidMiner) y CART (en Knime). Se utilizaron los atributos descritos en la Tabla 1. Se seleccionó como atributo meta o clase, el área de tesis y se trabajó sin poda. De la construcción del primer modelo en las tres herramientas, se observaron los siguientes tamaños de árboles: CART (59), J4.8 (45), ID3 (54), además de la compleja visualización e interpretación para la solución a nuestro problema planteado, los tres algoritmos utilizan como nodo raíz, el atributo Área de trabajo. El atributo carrera en J48 e ID3 es el segundo nodo elegido, mientras que en CART es utilizado en las terceras o cuartas líneas de división. Luego de estas comprobaciones y en correspondencia con la decisión ya tomada de investigar el problema a través de métodos de clasificación, sumado al interés de las cátedras de poder diferenciar entre ambas carreras, si existen diferencias entre las elecciones de los tesisistas, se dividió el conjunto de datos en dos. El primero para la carrera Licenciatura en Sistemas y el segundo para la carrera Ingeniería en Informática.
- *Experimento 2.* Nuestra pregunta planteada fue: *¿qué resultados arrojan los distintos algoritmos con los datos obtenidos divididos por carreras.?*
 - Si bien el algoritmo J4.8 en la herramienta WEKA es más claro de interpretar, no clasifica correctamente todas las instancias. Por ejemplo: Área=Varios → edad=25-30 →: Proc-s-Str (4.0/2.0) clasifica 4 instancias de las cuales 2 son incorrectas.
 - ID3 en RapidMiner en Área= Varios → edad= 25-30 → de las 4 instancias distribuye 2 instancias en Procesamiento de Señales y las otras 2, en Agentes y Sistemas Inteligentes.
 - En CART la regla es más compleja ya que realiza divisiones binarias y para el caso de atributos con varios valores dificulta su lectura. Sin embargo, entre la edad 25-30 de los alumnos que trabajan en varias áreas, solo clasifica las instancias de Agentes y Sistemas Inteligentes, dejando sin clasificar las instancias de Procesamiento de Señales. Se concluye que este algoritmo no es recomendable para atributos con varios valores.

En la Figura 2 se muestra la aplicación del algoritmo J4.8 utilizando la herramienta WEKA, con los datos correspondientes para la carrera Licenciatura en Sistemas. En la Tabla 13 se muestra el análisis realizado de los datos correspondientes a la distribución de los alumnos por carrera y el área de tesis elegida. De la tabla 13, se visualiza que el área de tesis más seleccionada es Agentes y Sistemas Inteligentes para ambas carreras y que los tesisistas se desempeñaban laboralmente en desarrollo o en distintas áreas en el momento de inicio del trabajo de tesis. Con los árboles de decisión obtenidos, se confirma que el área de Sistemas Inteligentes es la más seleccionada con una distribución significativa para ambas carreras [17].

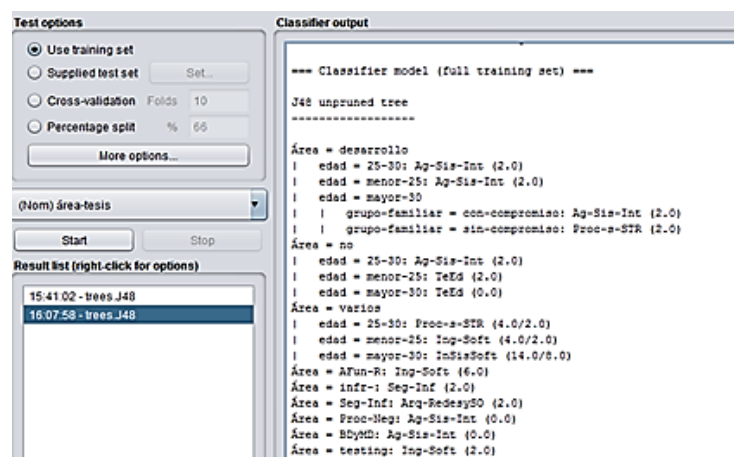


Figura 2. Modelo para la carrera Licenciatura en Sistemas utilizando el algoritmo J4.8 en la herramienta WEKA

Tabla 13. Comparativa de la elección del área elegida para realizar la tesis en ambas carreras

	Total estudiantes	Ingeniería	Licenciatura
Área Tesis	114	68	46
Innovación en Sistemas de Software	16%	18%	13%
Tecnología y Educación	14%	20%	
Agentes y Sistemas Inteligentes	40,50%	44%	35%
Ingeniería de Software	12%		26%
% de las 3 área más seleccionadas	83%	82%	74%

- *Análisis del algoritmo Naïve Bayes.* El fundamento principal del clasificador Naïve Bayes realizado por Duda & Hart en el año 1973 [18] es la suposición de que todos los atributos son independientes, conocido el valor de la variable clase. Por cierto, asumir esta suposición es bastante fuerte y poco realista, pero el clasificador Naïve Bayes (NB), en la mayoría de los casos es uno de los clasificadores más utilizados, afirmación que se evidenció en los resultados del SMS realizado. La hipótesis de independencia asumida por el clasificador NB da lugar a un modelo gráfico probabilístico en el que existe un único nodo raíz (la clase), y en la que todos los atributos son nodos hojas que tienen como único padre a la variable clase.

En cualquier sistema de clasificación de patrones se tiene un conjunto de datos representados por atributos y valores, donde el problema consiste encontrar una función que clasifique dichos ejemplos. La idea de usar el teorema de Bayes en cualquier problema de aprendizaje automático es que se puede estimar la probabilidad a posteriori de cualquier hipótesis consistente con el conjunto de datos.

Una red bayesiana [18] es un grafo acíclico dirigido en el que cada nodo representa una variable y cada arco una dependencia probabilística, en la cual se especifica la probabilidad condicional de cada variable dados sus padres, la variable a la que apunta el arco es dependiente (causa-efecto) de la que está en el origen de éste. La topología o estructura de la red nos da información sobre las dependencias probabilísticas entre las variables, pero también sobre las independencias condicionales de una variable (o conjunto de variables) dada otra u otras variables, dichas independencias, simplifican la representación del conocimiento (menos parámetros) y el razonamiento (propagación de las probabilidades).

Existen dos maneras de justificar los enlaces que se introducen u omiten al construir la red. La primera es de naturaleza teórica: se forma un modelo causal a partir de la experiencia de un especialista y se trazan los arcos correspondientes al modelo. El otro camino para justificar la red consiste en realizar una comprobación empírica a partir de un conjunto suficientemente amplio de casos, utilizando las herramientas estadísticas que se emplean para detectar correlaciones. La estructura de la red, por si misma aporta gran cantidad de información cualitativa. En efecto, un arco XY indica, ya antes de conocer el valor concreto de probabilidad condicional, que hay una correlación entre ambas variables: el valor que toma X influye sobre la probabilidad de Y, y viceversa. Una ventaja de las redes bayesianas es que un mismo nodo puede ser fuente de información u objeto de predicción dependiendo de cuál sea la evidencia disponible. La información que resulta de una red se logra:

1. Obteniendo las probabilidades *a posteriori* de las variables de interés, dado que se conoce el valor que toman algunas otras variables observadas. Este tipo de razonamiento se suele utilizar en sistemas donde se desee realizar un diagnóstico o una predicción.
2. Buscando la configuración de las variables que maximicen la probabilidad conjunta dada la evidencia observada. Este proceso se conoce como *abducción* y se utiliza para explicar la evidencia observada.

- *Experimentos realizados en tareas predictivas*

- *Experimento 3.* Para esta etapa se utilizó la herramienta Elvira [19]. Ésta, permite construir una red a partir de la experiencia del especialista y también provee una interfaz que posibilita la introducción del set de datos, el rellenado de campos vacíos y admite la elección de distintos algoritmos (Naïve Bayes, TAN, KDB). El set de datos utilizados fue de 178 instancias. La pregunta de investigación formulada fue: al usar el algoritmo NB como clasificador *¿Existe diferencia con el algoritmo J4.8?* Para dar respuesta a este cuestionamiento, se utilizó Weka en modo experimenter, donde se realizó una corrida con el mismo set de datos, pero con los algoritmos J4.8 y Naïve Bayes, los dos en cross-validation con 10 carpetas. El resultado obtenido fue: El algoritmo Naïve Bayes tiene un rendimiento del 48,06% contra el algoritmo J4.8 cuyo rendimiento es de 47,46%
- *Experimento 4.* Se utilizó el software Elvira con el algoritmo NB. De las 178 muestras se eliminaron los atributos no relevantes, detectados con los algoritmos de selección de variables relevantes, luego se aplicó el algoritmo Naïve Bayes obteniéndose la red que se muestra en la Figura 3, donde la variable clase es el Área de elección de tesis y los nodos hijos son las variables independientes: carrera, edad, grupo familiar, área de trabajo. Se observa que en esta instancia no se separaron los datos por carreras, ya que la red

muestra esta diferencia al tener el atributo carrera como nodo hijo. El software Elvira ofrece la posibilidad de visualizar la distribución conjunta de probabilidades, al cambiarse al modo inferencia. En la Figura 4 se muestran las mismas.

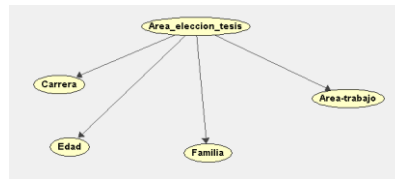


Figura 3. Red armada en Elvira

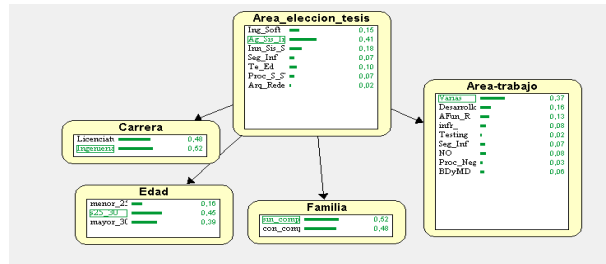


Figura 4 Modo inferencia en Elvira. Distribución de probabilidades conjuntas

- Experimento 5.** Nuestra última pregunta de investigación fue: *¿Qué predicción realiza la red bayesiana?* En el modo inferencia se puede cargar un nuevo caso (evidencia) desconociendo el valor de la clase. La red predice cual sería la probabilidad de que esa persona elija un área de tesis específica. En la Figura 5, se muestra la evidencia cargada en los nodos marcados de color gris y con línea roja el valor del atributo seleccionado, donde: carrera es Licenciatura, edad mayor a 30 años, Familia: con compromiso familiar y trabaja en desarrollo.

La inferencia (predicción) que realiza la red es: *la persona puede elegir Agentes y Sistema Inteligentes en un 47% o Innovación en sistemas de software en un 47%.* Si se cambia la evidencia en donde: carrera es Licenciatura, edad mayor a 30 años, compromiso familiar, pero trabaja de Analista funcional y Requerimientos, resulta que la inferencia en la red es Ingeniería de software en 82% (Figura 5). En la Figura 6, los cuadros en gris muestran los nodos que cargan las evidencias, con las líneas rojas en el valor que toma el atributo seleccionado. La red infiere el atributo Área de elección de tesis (nodo amarillo).

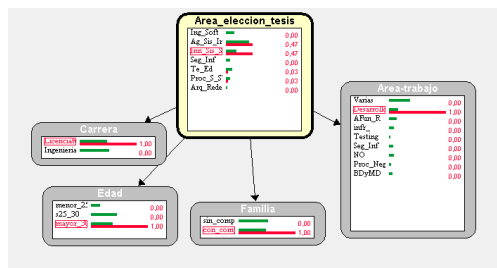


Figura 5. Probabilidad a posteriori de una persona que trabaja en desarrollo

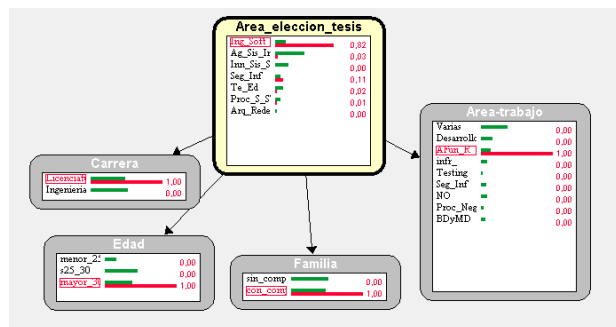


Figura 6. Probabilidad a posteriori de una persona que trabaja como analista funcional y requerimientos

2.3.4 Fase de Evaluación e Interpretación de los datos

De la aplicación de los algoritmos de evaluación utilizados se obtuvieron cinco atributos relevantes, con los cuales se realizaron los distintos modelos tanto descriptivos, como predictivos. Estos evaluadores dejaron fuera atributos como: sexo, motivos por el cual eligió la tesis, edad al comienzo de la cursada de la tesis; estos atributos se podrán

usar para futuros trabajos, donde las preguntas de investigación requieran su evaluación. Las tendencias generales encontradas al evaluar los árboles de decisión son las siguientes:

- De la carrera Licenciatura en Sistemas, los árboles de decisión obtenidos muestran que las personas que trabajaban en el rubro Varios, no se inclinan por el área de tesis: Agentes y Sistemas Inteligentes; lo que resulta una tendencia mayoritaria entre todos los tesisistas. Sin embargo, es el área seleccionada por los tesisistas que trabajaban Desarrollo de software. Los tesisistas que trabajaban como Analistas funcionales, se inclinan por el área Ingeniería de Software. Todos los tesisistas que eligen Innovación en Sistemas de Software trabajaban en el rubro Varios.
- De la carrera Ingeniería en Informática, se observa que el área de tesis Agentes y Sistemas Inteligentes es elegida tanto por los alumnos que trabajaban en Desarrollo, como los que lo hacían en el rubro Varios. Los tesisistas que trabajaban en Desarrollo se inclinan también por Innovación en Sistemas de Software. Entre los alumnos que seleccionan Tecnología y Educación trabajaban en las áreas: Analista Funcional, Infraestructura, y Seguridad en Informática.

Las tendencias generales encontradas al evaluar la red bayesina aplicando el algoritmo Naïve Bayes son las siguientes:

- La red obtenida, a través de la evaluación empírica de los datos utilizados, presentada con la distribución conjunta, refleja las mismas características que el modelo obtenido por los árboles de decisión.
- El modelo descriptivo realizado con redes bayesianas (en comparación con el modelo descriptivo realizado con árboles de decisión) resultó más comprensible gracias a su rica semántica, que permite al usuario entender fácilmente los resultados.
- La diferencia consiste en que los árboles de decisión no asumen la hipótesis de independencia de los atributos mostrando una variación con respecto a las redes bayesianas. En ambos casos formalizan en gran medida la realidad que perciben los docentes de las cátedras de tesis.
- El modelo presentado para obtener la predicción es claro y presenta los datos como probabilidades.

3. CONCLUSIONES

El SMS permitió sistematizar la evidencia empírica de la aplicación de minería de datos educacional en el Nivel de Educación Superior. Este sentó las bases para nuestro trabajo en cuanto a los modelos descriptivos y predictivos utilizados en el desarrollo de la propuesta.

Se trabajó con el proceso KDD (en inglés Knowledge Discovery in Databases) "Descubrimiento de conocimiento en bases de datos". el cual permitió sistematizar el proyecto de manera controlada.

Se diseñó un instrumento de recolección de datos (cuestionario denominado "TESISTAS - UM) y se le aplicaron los métodos de evaluación de calidad para su aplicación. Este permitió de manera adecuada la recolección de los datos complementarios del sistema de gestión académica de la Universidad como así también la hoja de cálculo con la que contaban las cátedras de tesis.

Se logró recolectar una muestra, que si bien resulta escasa permitió al grupo de investigación la definición de los perfiles de los tesisistas, con el aporte información útil, en relación con la incidencia del campo laboral en que se desempeña al inicio de su trabajo de tesis y el área de investigación seleccionada para su trabajo de fin de carrera.

Como trabajos futuros se identifican: a) la obtención de nuevos modelos, utilizando técnicas de DM y algoritmos aún no abordados en este trabajo, b) realizar un análisis comparativo con las carreras de otras Universidades, c) explorar en otras carreras de la Universidad de Morón, el fenómeno estudiado.

REFERENCIAS

- [1] A. Peña. "Educational Data Mining. A Survey and a data mining based analysis of recent works." *Expert Systems with applications*, vol. 41, no. 4, pp. 1432-1446, 2014.
- [2] C. Romero. "Educational Data Mining: a review of a State of the art". *IEEE Transactions on Systems, Man and cybernetics, Part C (Applications and reviews)*, vol. 40, no. 6, pp. 601-618, 2010.
- [3] C. Romero, Ventura, S., Pechenizkiy, M. & Baker, R. *Handbook of educational data mining*. CRC Press. Eds. 2010.
- [4] B. Kitchenham, & Charters, S. *Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. Technical Report EBSE Joint Report. Keele University and Durham University, 2007.
- [5] M. Genero, Cruz, J. & M. Piattini. *Métodos de investigación en ingeniería del software*. Madrid: Editorial Ra-Ma, 2014.
- [6] J. Hernández, Ramírez M. & C. Ferri. *Introducción a la Minería de Datos*. Madrid: Pearson, 2004.
- [7] University of Waikato. *Weka*. New Zealand Machine Learning Group. [Accessed February 2019].
- [8] Rapid Miner Studio. *Rapid Miner*. Rapid Miner Management Team. [Accessed February 2019].

- [9] R. Hernández, Fernández, C. & Baptista, L. *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw Hill, 2006.
- [10] J. Sierra, Vizcaíno A., Genero M. & Piattini M. "A systematic mapping study about socio-technical congruence". *Information and Software Technology*, vol. 94, pp. 111-129, 2018.
- [11] M. Panizzi. "Establecimiento del estado del arte sobre la Minería de Datos Educativa en el Nivel Superior: Un Estudio de Mapeo Sistemático". *Revista de Investigaciones Científicas del Universidad de Morón*, vol. 3, no. 1, 2019.
- [12] I. Sattolo, Alvarez G., Armilla N., Bravo O., García M., Lafont J., Mariuz G., Mira L. & Panizzi M. Hacia la caracterización de perfiles de tesis de Carreras de Informática de la Universidad de Morón. En *XIII Congreso Nacional de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología*. 2018.
- [13] U. Fayyad, Piatetsky G. & Smyth P. "From Data Mining to Knowledge Discovery: An Overview". *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 1-34, 1996.
- [14] J. Quinlan. "Induction of decision trees", pp. 81-106. [Accedido Feb. 2019].
- [15] L. Breiman, Friedman J., Olshen R. & Stone C. *Classification and regression trees*. Belmont: Wadsworth Press, 1984.
- [16] A. Moreno, Purificación M., & Purificación M. Aprendizaje basado en árboles de decisión: Un estudio crítico desde Weka, RapidMiner y SPSS Modeler. En *XXVI Simposio Internacional de Estadística*, 2016.
- [17] I. Sattolo, Alvarez G., García M., Lafont J., Mira L., Mariuz G., Armilla N. & Panizzi M. Descubrimiento de las áreas de investigación seleccionadas por los tesis de las carreras de informática de la UM mediante árboles de decisión. En *XXIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2018.
- [18] H. Castillo. *Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas*. Accessed February, 2019.

Hacking en servicios Web a través de redes WiFi abiertas

Francisco C. Valle D.¹

Carlos S. Herrera G.²

Cristian S. Pedraza C.³

Universitaria Agustiniana Uniagustiniana – Colombia

El uso en los diferentes sectores de las redes de acceso a internet a través de tecnología WIFI se ha vuelto bastante común en nuestros días, en entornos educativos se observa frecuentemente como los estudiantes realizan uso constante de redes abiertas, para obtener acceso a populares redes sociales, así como a los diferentes servicios que ofrecen las instituciones educativas en internet, sin tener conciencia de los riesgos en materia de ciberseguridad a los que se exponen. En el presente trabajo se realiza un ataque a la información que circula en redes WiFi abiertas, enfocados en el tráfico de información que se genera durante una conexión entre el punto de acceso inalámbrico y un usuario. Se realizaron diferentes pruebas dentro de la Universitaria Agustiniana, donde mediante el uso diferentes equipos y componentes de telecomunicaciones se simuló el tráfico generado al consultar diferentes servicios Web. Se implementó un ataque tipo *hombre en el medio* poniendo a prueba diferentes servicios utilizados por los estudiantes dentro de la Universitaria Agustiniana tales como WhatsApp, Facebook, correo electrónico y aplicativos de uso institucional como las aulas virtuales y el aplicativo web de la biblioteca. Después de realizado el ataque y con los datos capturados se efectúa un análisis de la data capturada mediante la herramienta Wireshark dentro del sistema operativo Kali Linux, en donde se observa que la navegación en algunas de las aplicaciones no cifra los datos, esta vulnerabilidad puede ser explotada con éxito para obtener datos sensibles de los usuarios de dichas redes. También se evidencia que aplicaciones que implementan una VPN, pueden convertirse en una herramienta de seguridad efectiva al momento de consultar servicios que no utilizan cifrado mientras se navega mediante redes WiFi abiertas.

1. INTRODUCCIÓN

En nuestros días los avances tecnológicos nos permiten vivir conectados a internet desde diversos lugares, las redes de acceso inalámbrico a internet que operan bajo el estándar de comunicaciones 802.11 (WiFi) se han vuelto populares para este fin y su presencia es común en diferentes entornos como los educativos [1], y los centros comerciales. En estos últimos observó que en un promedio de 11 minutos se conectan alrededor de 6407 dispositivos a estas redes [2], dicha popularidad sumada al esfuerzo que realizan los diferentes gobiernos por garantizar el acceso a internet a sus ciudadanos, han permitido el despliegue y uso de numerosas redes WiFi de acceso gratuito a internet, sin embargo, los esfuerzos enfocados en concientización en temas de seguridad informática no crecen al mismo nivel [3], [4].

Se estima que en el 2017 los costos anuales asociados a violaciones de datos para la empresa alcanzaron en promedio unos US \$ 3.86 millones, según datos presentados por el anual *data breach report* patrocinado por IBM [5] y que durante el 2018 los grupos de ataque dirigidos continuaron representando una amenaza significativa para las organizaciones, los 20 grupos más activos seguidos por Symantec lograron un promedio de 55 organizaciones en los últimos tres años, frente a los 42 entre 2015 y 2017 [6]. El éxito de un gran número de ataques se debe en parte a la falta de conocimiento de ciberseguridad por parte de los individuos [7]. Esto a pesar de los esfuerzos realizados por los investigadores de seguridad informática a través de los cuales se pretende prevenir e identificar las numerosas formas de ataques que pueden sufrir las redes WiFi [8]–[19].

2. MÉTODO

2.1 Hacking de datos en redes abiertas.

En el desarrollo de la presente investigación, se realizará un ataque conocido como hombre en el medio [20]–[23] (traducido del inglés MITM) en una red WIFI abierta. En virtud de que el medio de comunicación mediante el cual se transmiten los datos en una red WIFI es el espacio, es posible capturar los datos transmitidos tanto por el *access point* como por cualquier dispositivo que se encuentre conectado a este, simplemente ubicándose dentro de su rango que cobertura y configurando una tarjeta de red en modo monitor, de manera que esta capture los paquetes que sean dirigidos a cualquier dispositivo de red. En el desarrollo de la presente investigación se utilizaron los siguientes elementos técnicos (hardware y software) en el proceso de hacking.

1. AP E410 Cambium.
2. Computador portátil Dell latitude – Como dispositivo atacante
3. Computador portátil Asus X540Y – como dispositivo víctima.
4. Sistema operativo Kali Linux, el cual es un proyecto de código abierto mantenido y financiado por Offensive Security.

¹ francisco.valle@uniagustiniana.edu.co

² carlos.1996.h@hotmail.com

³ stivenpedraza_12@hotmail.com

5. Wireshark – Un analizador del protocolo de red.
6. Suite de Aircrack-NG

Para realizar el ataque conocido como *hombre en el medio* se configura una red inalámbrica abierta con el SSID de “Virus-No-Conectar” de manera que este nombre desincentive la conexión a dicha red de las personas que se encontraran dentro de su área de cobertura y no forman parte del equipo investigador (esto con el fin de no vulnerar sus datos). En el computador que fungirá como máquina atacante se utiliza la suite Aircrack-ng con el fin obtener toda la información que se envía entre el *access point* y el computador de la víctima, desde el cual se consultaran los diferentes servicios web. Para lograr la captura de paquetes en la máquina atacante se siguen los siguientes pasos:

1. Configurar en el dispositivo atacante la tarjeta inalámbrica de red en modo monitor, escribiendo en una terminal el comando `airmon-ng start wlan0`, con lo cual se habilita la interface inalámbrica (wlan0) en modo monitor para la captura de paquetes.
2. Se identifica el *access point* – AP, sobre el cual se realizará el ataque, su dirección MAC y el canal en el cual transmiten los datos, mediante la instrucción `airodump-ng wlan0mon`.
 - a. Dirección MAC - 58:C1:7A:19:3C:30
 - b. Canal 6
3. Se configura la máquina atacante para capturar el tráfico entrante y saliente del AP donde se encuentra conectado el equipo víctima, mediante el comando `airodump-ng -c 6 --bssid 58:c1:7a:19:3c:30 -w hombre-en-medio wlan0mon`, los datos obtenidos se guardan con el nombre de *hombre en medio* para su posterior análisis.

La totalidad del tráfico capturado se analiza con Wireshark. En la Figura 1 se puede observar parte del proceso de captura de datos.

```

Applications ▾ Places ▾ Terminal ▾
root@AnonimusUniagus: ~
File Edit View Search Terminal Help
CH 6 ][ Elapsed: 5 mins ][ 2018-09-10 14:21
BSSID PWR RXQ Beacons #Data, #/s CH MB ENC CIPHER AUTH ESSID
58:C1:7A:19:3C:30 0 100 3003 6727 12 6 54e OPN VIRUS-NO-CONECTAR
BSSID STATION PWR Rate Lost Frames Probe
58:C1:7A:19:3C:30 F0:03:8C:87:E8:15 -13 48e 9e 0 6218
root@AnonimusUniagus:~#

```

Figura 1. Pantallazo de la captura de datos

2.2 Servicios sobre los cuales se realiza la captura del tráfico

En todos los casos el computador asociado a la víctima se conectó a internet utilizando como pasarela la red abierta implementada con tecnología WIFI llamada “VIRUS-NO-CONECTAR”, al tiempo que desde el equipo configurado como máquina atacante se realizaba la captura de los datos asociados con el *access point*. Se realizó captura de tráfico respecto de la navegación en diferentes servicios, algunos asociados a entornos universitarios y otros relacionados con actividades sociales con el ánimo de simular entornos reales en nuestros días.

- El primer servicio elegido para el análisis es la plataforma de aulas virtuales de la universitaria Uniagustiniana, esta plataforma es utilizada por estudiantes y docentes de la Uniagustiniana como apoyo en los procesos académicos llevados al interior de la institución.
- El segundo servicio analizado fue la biblioteca virtual de la Uniagustiniana, de uso continuo para la consulta revisión y/o renovación del material disponible en la biblioteca.
- El tercer servicio analizado es la popular plataforma de comunicaciones WhatsApp, la cual para tranquilidad de sus usuarios notifica que toda la información transmitida a través de la misma se encuentra protegida con cifrado de extremo a extremo.
- El cuarto servicio analizado es la red social Facebook comúnmente frecuentada por jóvenes y utilizada como medio de comunicación masivo.
- El quinto servicio sobre el cual se realiza la captura de datos es el de correo electrónico, de uso común en ambientes educativos y empresariales.

3. RESULTADOS

3.1 Captura – Aulas virtuales Uniagustiniana

El ataque se efectuó en un estimado de tres minutos, tiempo durante el cual desde el computador de la víctima se generó uso de la plataforma por parte de uno de los investigadores. En total se capturaron 54950 paquetes, de los cuales 2649 (Tabla 1) son provenientes de la plataforma virtual de asignaturas, se observó que el 100% del tráfico se encuentra sin cifrado.

Tabla 1. Estadística de paquetes capturados

IP	Servicio	Paquetes	Representativo en los datos capturados
172.16.0.151	Aulas Virtuales	2649	4,8%

Al analizar los datos capturados con el PC atacante se obtuvo el usuario y la contraseña utilizados desde el equipo víctima (Figura 2 - Usuario: 1920141021; Password: c4rlit05), contenido grafico de los cursos y datos de otros estudiantes de una misma asignatura, así como información de un curso preparatorio para el examen Saber pro.

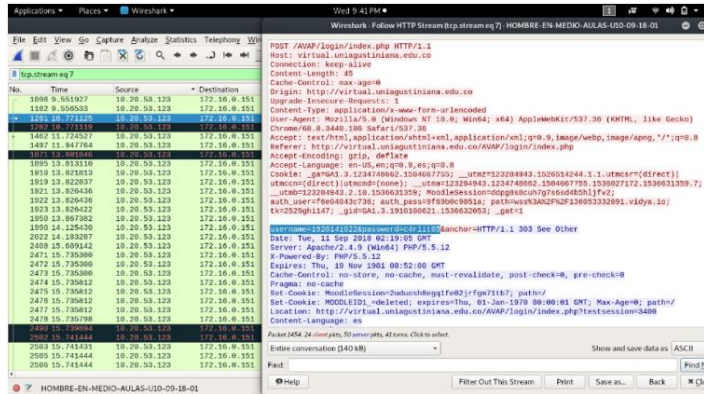


Figura 2. Información capturada de Aulas virtuales

3.2 Captura – Biblioteca virtual Uniagustiniana

El ataque se efectuó en un estimado de tres minutos, al analizar el tráfico de datos capturados se identificó que el mismo se envía en texto plano, pudiendo capturar las credenciales de acceso del usuario víctima del ataque (Figura 3 - UserIS:1920141022 y su Password:1014278670).

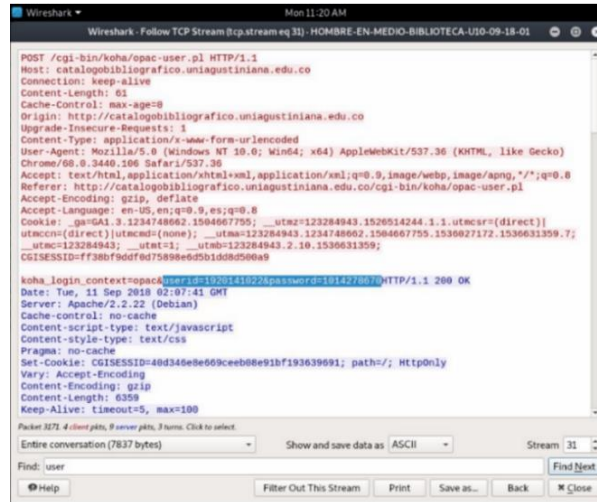


Figura 3. Datos capturados en texto plano

3.3 Captura – WhatsApp Web

El ataque se efectuó en un estimado de 3 minutos, tiempo durante el cual desde el computador de la víctima se enviaron datos a través de la aplicación WhatsApp Web. Sobre el tráfico obtenido desde el computador del atacante, se identificó la dirección IP pública (157.240.14.53) que responde a las solicitudes enviadas por el cliente, así como las coordenadas geográficas asociadas a la misma "37°27'32.4"N 122°10'41.2"W" (Figura 4) ubicadas en la ciudad de Menlo Park, California y asociado a Facebook Inc.

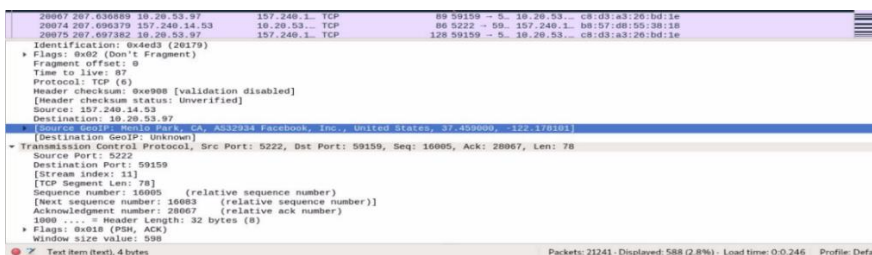


Figura 4. Geolocalización de la IP capturada

Al verificar la información de georreferenciación de la dirección IP obtenida, se identifica que la misma pertenece a una zona residencial, por lo cual se estima que las peticiones son respondidas por un servidor fantasma. En la Figura 5 se observa parte del tráfico capturado asociado al uso de WhatsApp Web. Al revisar el tráfico capturado en la Figura 6, se identifica que toda la información asociada al proceso de comunicación se encuentra cifrada.

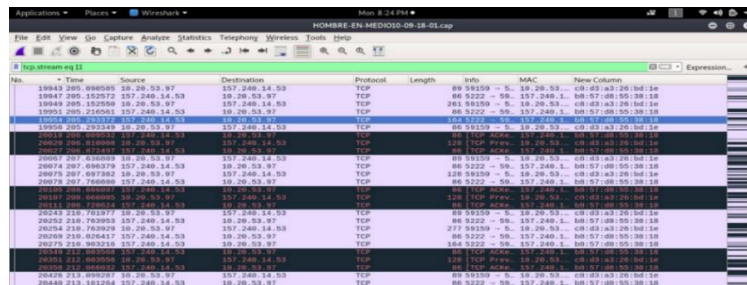


Figura 5. Captura de tráfico WhatsApp Web



Figura 6. Datos cifrados transmitidos por WhatsApp Web

3.4 Captura - Facebook

En ataque se realizó durante un tiempo estimado de 3 minutos, en la captura de datos realizada respecto de la red social Facebook se generó tráfico desde el computador de la víctima, simulando el uso normal que se realizaría de dicha red. Capturando un total de 45.868 paquetes, de los cuales se identificó que 6834 contenían tráfico asociado a la red social. Parte del tráfico capturado se puede observar en la Figura 7.

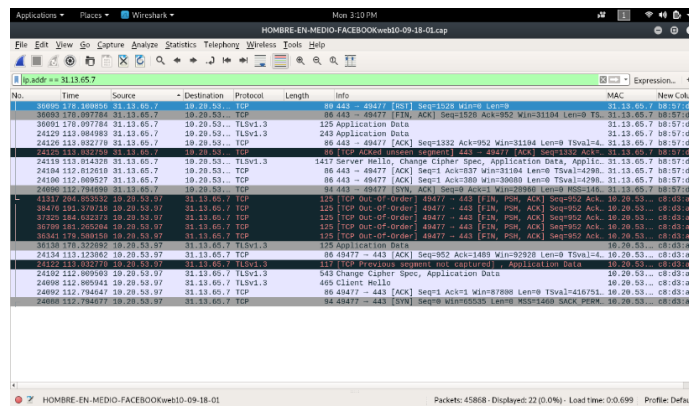


Figura 7. Captura de datos - Facebook

En la Tabla 2 se presenta la información de las direcciones IP públicas utilizadas en el proceso de comunicación.

Tabla 2. Estadística de paquetes capturados - Facebook

IP	Servicio	Paquetes	Representativo en los datos capturados
31.13.65.7	Facebook	22	0,047%
31.13.65.38	Facebook Ireland	64	0,1%
157.240.6.23	Facebook	356	0,8%
157.240.6.18	Facebook	256	0,6%
157.240.6.19	Facebook	313	0,7%
200.114.57.81	EPM Telecomunicaciones	1122	2,4%
200.114.57.82	EPM Telecomunicaciones	1304	2,80%
186.31.253.81	IP Bogotá Colombia	3397	7,40%

Se encuentra que cinco direcciones IP asociadas a la compañía Facebook (ubicadas en Menlo Park y en Dublín, Irlanda) manejan un sistema de seguridad similar al identificado en la aplicación WhatsApp, es decir estos utilizan servidores fantasmas que responden y reenvían las solicitudes. De igual manera en las Figuras 8 y 9 se observa que todo el tráfico relacionado con las mismas se encuentra cifrado.

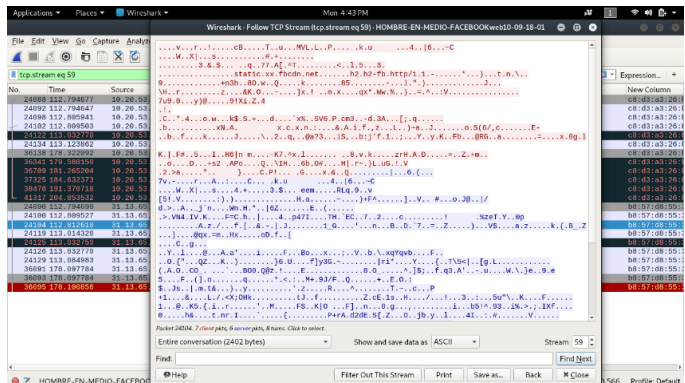


Figura 8. Comunicación cifrada relacionada con la IP 31.13.65.7

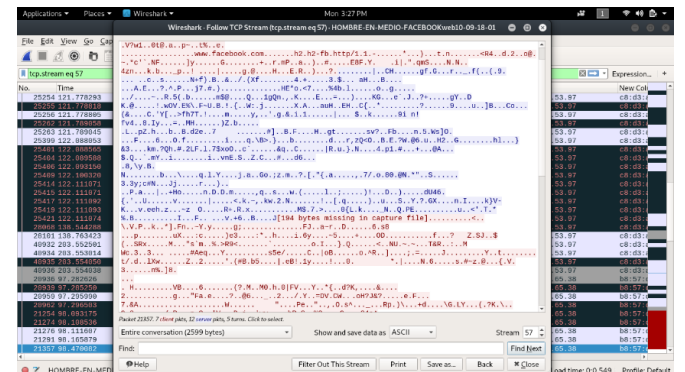


Figura 9. Comunicación cifrada relacionada con la IP 31.13.65.38

Se identifica (Figura 10) que dos direcciones IP ubicadas en la ciudad de Medellín pertenecientes a la empresa EPM Telecomunicaciones, que gestionan parte del tráfico generado para consultar la red social.

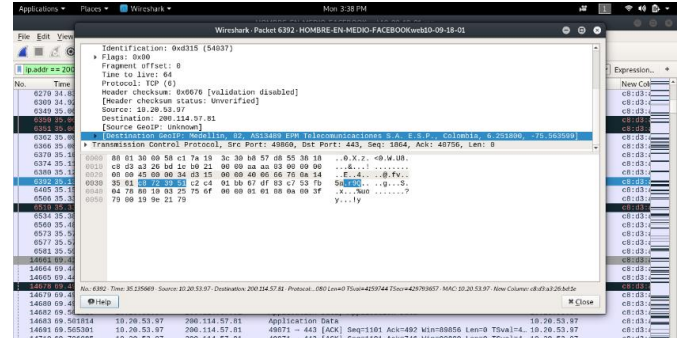


Figura 10. Comunicación relacionada con la IP 200.114.57.81

El tráfico generado por los servidores ubicados en la ciudad de Medellín también se encuentra cifrado, como se puede observar en la Figura 11.

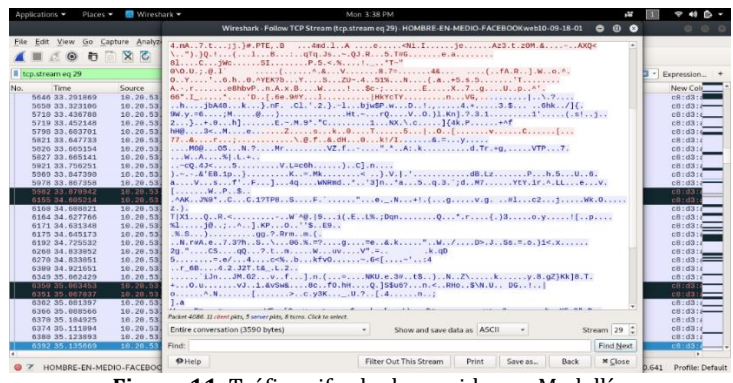


Figura 11. Tráfico cifrado de servidor en Medellín

En la captura también se identifica en uno de los paquetes analizados la información “scontent.fbog3-1.fna.fbcdn.net” (Figura 12), donde podemos revisar la captura de datos realizada a la IP 157.240.6.23 que responde directamente de un dominio de Facebook, se encuentra el siguiente contenido xx.video.fbcdn.net dentro de un paquete.

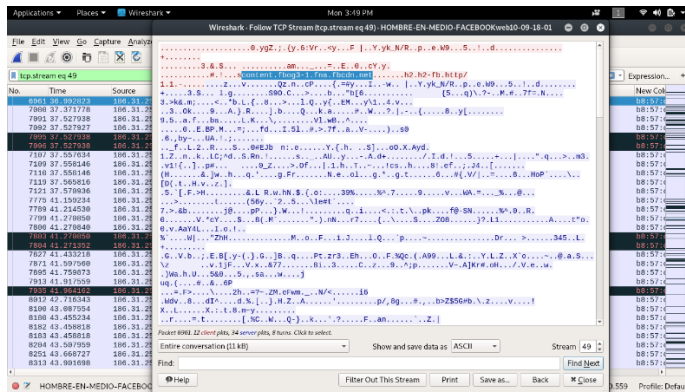


Figura 12. Tráfico cifrado de servidor en Bogotá

Lo cual indica que la dirección IP 186.31.253.81 que no tiene asociado ningún dominio en los valores GeoIP dentro de los parámetros de IPV4 y responde a coordenadas de la ciudad de Bogotá (Figura 13), está generando u obteniendo tráfico a través de la aplicación de Facebook.

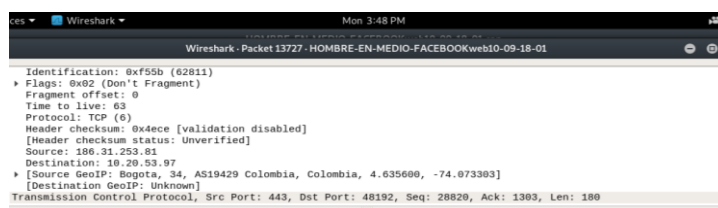


Figura 13. Comunicación relacionada con la IP 168.31.253.81

3.5 Captura - Correo electrónico

La captura de datos asociados a un correo electrónico se implementó utilizando los servicios de correo que presta Google a través de Gmail. Se capturaron un total de 25.348 paquetes de los cuales 3149 están asociados al servicio de correo electrónico de Google. Parte de la captura se puede observar en la Figura 14.

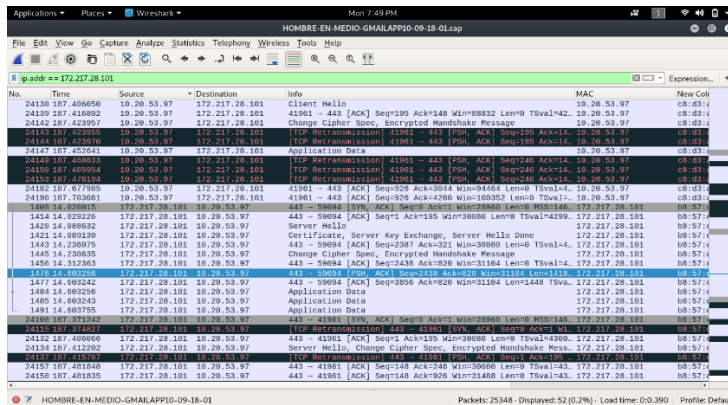


Figura 14. Captura de datos Gmail

Se identificó que los servidores que responden a las peticiones se encuentran ubicados dentro del terreno asociado a la NASA (Figuras 15 y 16).

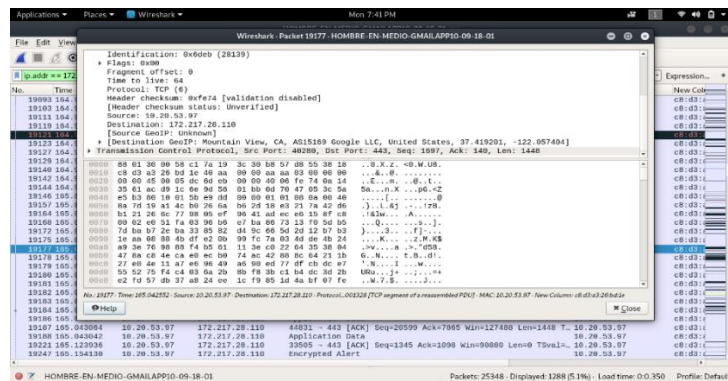


Figura 15. Comunicación relacionada con la IP 172.17.20.210

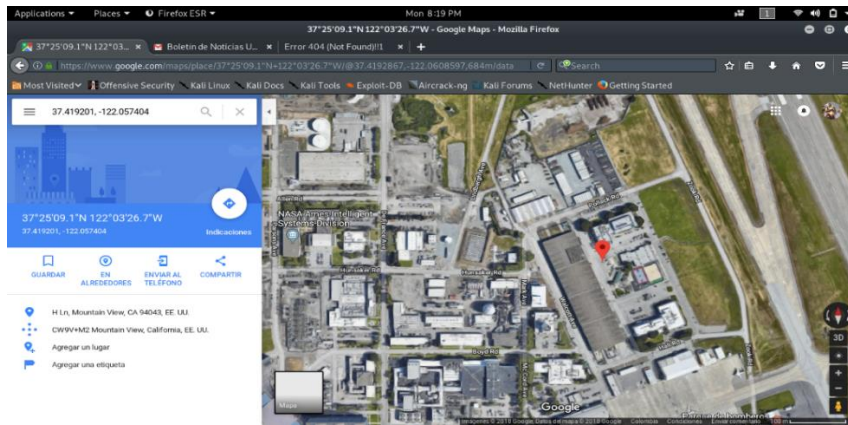


Figura 16. Ubicación del servidor perteneciente a Google

En la Tabla 3 se presenta la información de las direcciones IP públicas utilizadas en el proceso de comunicación.

Tabla 3. Estadística de paquetes capturados – correo electrónico

IP	Servicio	Paquetes	Representativo en los datos capturados
172.217.28.110	Google LLC	1288	5,1%
172.217.28.101	Google LLC	52	0,2%
172.217.28.109	Google LLC	741	2,9%
172.217.28.99	Google LLC	196	0,8%
216.58.222.202	Google LLC	872	3,4%

Dentro de la captura se identifica que el 100% de los paquetes asociados al tráfico generado por el consumo de correo electrónico se encuentran cifrados (Figura 17).



Figura 17. Tráfico cifrado relacionado con Gmail

3.6 Uso de VPN

Se implementó una VPN como mecanismo de seguridad al navegar en redes abiertas y se realizó una nueva captura de datos sobre el portal de aulas virtuales de la Universitaria Agustiniiana, el cual en pruebas anteriores enviaba la información en texto plano. Al revisar la nueva captura de datos se identificó que el nuevo tráfico se encuentra cifrado, tal y como se observa en la Figura 18.



Figura 18. Tráfico cifrado por VPN

3.7 Resumen de resultados

En la Tabla 4 se presenta el resumen de los resultados según las pruebas realizadas a una de las aplicaciones Web.

Tabla 4. Resumen de resultados

Nombre de la prueba	Duración	Tráfico Cifrado	Observaciones
Hombre en medio Aulas Virtuales	0:03:00	NO	El tráfico se transmite en texto plano y no está cifrado. Se logra capturar datos de acceso a la plataforma, información y material gráfico de la plataforma e información de usuarios relacionados en una misma aula virtual
Hombre en medio Biblioteca Virtual	0:03:00	NO	El tráfico se transmite sin cifrar lo que permite la captura de información (usuario y contraseña)
Hombre en medio Facebook	0:03:00	SI	El tráfico se encuentra cifrado y cumple con los estándares básicos de seguridad, se encontró un tipo de desvío de tráfico hacia 2 direcciones IP sin ninguna asociación hacia Facebook.
Hombre en medio Gmail	0:03:00	SI	El tráfico se envía cifrado, previniendo el robo de credenciales de acceso.
Hombre en medio WhatsApp	0:03:00	SI	El tráfico enviado desde la aplicación de WhatsApp efectivamente cumple con el cifrado punto a punto evitando que la información se pueda filtrar en redes abiertas sin ningún tipo de cifrado.

4. CONCLUSIONES

Se observa que las redes WIFI abiertas presentan una vulnerabilidad al no cifrar la información que se envía a través de estas, relegando la obligación de garantizar la confidencialidad de la información a protocolos establecidos en capas superiores, en otras palabras, la confidencialidad de la información depende de medidas tomadas por el servicio WEB que sea consultado por el usuario de la red.

Se encontró que servicios prestados por la Universitaria Uniagustiniana, son susceptibles de ataques tipo MITM al ser consultados desde una red WIFI abierta.

Se evidencia que servicios WEB que cifran en la capa de aplicación la data, aún pueden proveer a los atacantes información valiosa relacionada con la geolocalización de sus servidores.

Se identificó que populares servicios WEB utilizan servidores fantasmas como medida de seguridad que impide el conocer la ubicación física real de sus servidores.

Se pudo comprobar la efectividad de una VPN como medida que garantice la confidencialidad de los datos aun en entornos vulnerables, como lo son las redes WIFI abiertas cuando se navega o consulta servicios que no usan ningún protocolo para el cifrado de la información.

REFERENCIAS

- [1] B. Sriram and M. A. Sarrayrih, "An analytical study on user satisfaction on Wi-Fi services: A case study on Omani undergraduate environment," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 9, 2016.
- [2] F. Valle, "Estudio de usos y riesgos asociados a las redes abiertas bajo el protocolo IEEE 802.11 en la ciudad de Bogotá," in *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, 3rd ed., M. E. Serna, Ed. 2018, pp. 73–80.
- [3] N. Gcaza and R. von Solms, "A strategy for a cybersecurity culture: A South African perspective," *Electron. J. Inf. Syst. Dev. Ctries.*, vol. 80, no. 1, pp. 1–17, 2017.
- [4] N. A. Wahab, M. R. Ahmad, A. A. M. Isa, R. F. Malik, and M. R. M. Esa, "WiFi Temporal Coverage: Analysis of Socio-Economics Influences in Malaysia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 228, no. 1.
- [5] E. Donavan, "3 Ways to Combat (Growing) Cyber Threat," *cyber Def. Mag.*, pp. 1–97, 2019.
- [6] Symantec, "Informe sobre las amenazas para la seguridad en Internet de 2018 | Symantec MX," 2019.
- [7] Eleven Paths, "Informe de tendencias en ciberseguridad 2019," 2019.
- [8] C. Wang *et al.*, "Accurate sybil attack detection based on fine-grained physical channel information," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 3, pp. 1–23, 2018.
- [9] M. Gajewski, J. M. Batalla, G. Mastorakis, and C. X. Mavromoustakis, "A distributed IDS architecture model for Smart Home systems," *Cluster Computing*, Springer US, pp. 1–11, 2017.
- [10] M. Waliullah, A. B. M. Moniruzzaman, and M. S. Rahman, "An Experimental Study Analysis of Security Attacks at IEEE 802.11 Wireless Local Area Network," *Int. J. Futur. Gener. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 1, pp. 9–18, 2015.
- [11] J. Zhang *et al.*, "Defeat Your Enemy Hiding behind Public WiFi: WiGuard Can Protect Your Sensitive Information from CSI-Based Attack," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 4, p. 515, 2018.
- [12] J. Milliken, V. Selis, and A. Marshall, "Detection and analysis of the Chameleon WiFi access point virus," *EURASIP J. Inf. Secur.*, vol. 2013, no. 1, p. 2, 2013.
- [13] A. Bartoli, E. Medvet, and F. Onesti, "Evil twins and WPA2 Enterprise: A coming security disaster?" *Comput. Secur.*, vol. 74, pp. 1–11, 2018.
- [14] J. Xiong and K. Jamieson, "SecureArray: improving WiFi security with fine-grained physical-layer information," in *Proceedings of the 19th annual international conference on Mobile computing & networking - MobiCom '13*, 2013, p. 441.
- [15] K. K. K. Fong and S. K. S. Wong, "Wi-Fi adoption and security in Hong Kong," *Asian Soc. Sci.*, vol. 12, no. 6, pp. 1–22, 2016.
- [16] J. S. Atkinson, J. E. Mitchell, M. Rio, and G. Matich, "Your WiFi is leaking: What do your mobile apps gossip about you?" *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 80, pp. 546–557, 2018.

- [17] B. Naeem, U. A. K. Chude-Okonkwo, R. Ngah, S. Z. M. Hashim, W. Maqboo, and S. Hashim, "Exploring the open problems and future trends concerning handovers in heterogeneous wireless networks: A review," *J. Teknol.*, vol. 3, no. 3, pp. 13–17, 2014.
- [18] C. Chilipirea, M. Baratchi, C. Dobre, and M. van Steen, "Identifying stops and moves in WiFi tracking data," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 11, pp. 1–15, 2018.
- [19] X. Guo and P. Xia, "Mine personnel location system based on Internet of things," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 439, no. 3, 2018.
- [20] T. Melamed, "An active man-in-The-middle attack on bluetooth smart devices," in *International Journal of Safety and Security Engineering*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 200–211.
- [21] R. A. Sowah, K. B. Ofori-Amanfo, G. A. Mills, and K. M. Koumadi, "Detection and Prevention of Man-in-the-Middle Spoofing Attacks in MANETs Using Predictive Techniques in Artificial Neural Networks (ANN)," *J. Comput. Networks Commun.*, vol. 2019, pp. 1–14, 2019.
- [22] E. P. Lane, "Neither Snow Nor Rain Nor MITM . . . An Empirical Analysis of Email Delivery Security," pp. 281–296, 2015.
- [23] F. Aliyu, T. Sheltami, and E. M. Shakshuki, "A detection and prevention technique for man in the middle attack in fog computing," in *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 141, pp. 24–31.

Análisis bibliométrico al desarrollo de software: Tendencias de investigación

Francisco Clemente V.¹

Paulo A. Gaona G.²

David A. Guerreo P.³

^{1,3} Universitaria Agustiniiana Uniagustiniana

² Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Colombia

El desarrollo de software ha sido epicentro de investigaciones asociadas con tendencias avanzadas en ingeniería que retan a la comunidad científica a producir sistemas y aplicaciones para obtener y/o gestionar información, de tal manera que las herramientas y los mecanismos cuenten con un desempeño eficaz y eficiente desde el consumo de datos por parte del usuario, así como una capacidad adaptativa frente a la complejidad de la ciencia de datos. El presente análisis bibliométrico de coocurrencia propone una serie de líneas de focalización asociadas al desarrollo de software a partir de elementos como la ingeniería de software, tendencias avanzadas, arquitecturas, marcos de trabajo, tecnología, seguridad y web semántica. Estas categorías fueron empleadas como ejes de clasificación para recopilar publicaciones sobre el consumo de datos, con el fin de proporcionar una línea base acerca de los aportes del desarrollo de software a la comunidad académica, encontrando que gran parte de las investigaciones convergen en: inteligencia artificial, análisis de grandes volúmenes de datos (*big data*), internet de las cosas, computación en la nube y procesamiento de imágenes.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el software es considerado un bien intangible de alto valor económico en diversos entornos de aplicación, considerando que es un producto que se basa principalmente en el conocimiento; siendo las compañías y la industria los sectores de mayor impacto en el ámbito internacional. Con el creciente uso de internet, una de las tendencias del software ha sido desarrollar soluciones basadas en servicios, en contraste con enfoques anteriores de distribución de software como producto [1]. Este hecho condujo a cambios fundamentales en el modelo de negocio de las empresas y, por tanto, en el modelo de distribución de software. En este sentido, algunos informes como el de la economía de la información realizado en 2012 [2] considera que la producción y el desarrollo de software pueden contribuir a la transformación estructural de las economías al reducir su dependencia de bienes de baja tecnología.

Estudios en la industria de desarrollo de software presentan dos tendencias tradicionales para la distribución de sus productos: la producción de código cerrado, protegida por derechos exclusivos de autor para su distribución, la cual es desarrollada bajo contratos de mano de obra; y la producción de código abierto, caracterizada por derechos no exclusivos del autor y desarrollada de forma cooperativa [3]. De acuerdo con el enfoque ofrecido por Landini [3], ambas formas de producción han existido desde el inicio de la industria del software y ninguna de ellas parece prevalecer de manera efectiva. Es así como la industria del software viene involucrando varios enfoques desde el punto de vista de infracción sobre los derechos de propiedad intelectual del software, al considerar el software como un bien económico importante para las empresas y la economía mundial. Para ello, es necesario analizar los sistemas de protección jurídica actual que brindan protección a este bien e identificar los aspectos que han contribuido al incremento de la piratería, así como la cuantificación del defecto de apropiabilidad en el software. Por otro lado, se presenta también los cambios en la configuración del mercado de software al analizar cómo los sistemas de protección jurídicos de software condicionan la estructura de distribución del mercado haciéndose más competitivo o más concentrado de acuerdo a la concesión de derechos de autor o patentes.

No obstante, en la actualidad, el consumo de datos disponibles sobre la web es un procedimiento asistido por herramientas basadas en software (independientemente de su forma de producción), las cuales definen un protocolo de comunicación entre el usuario y la información que este se encuentre consultando, de manera que el software alojado en un servidor se transforma en la interfaz que intermedia los agentes en un evento de transacción informática. Siendo esta herramienta una interfaz responsable de un servicio para los usuarios cuyos atributos corresponden a un dominio de información, preferiblemente estandarizado, la prestación de sus funciones es tan exitosa como las métricas que se proponen para ofrecerlo; es decir, el software postula un mecanismo de consumo de información capaz de resolver inconsistencias a la hora de realizar consultas, por medio de algoritmos u otras estrategias. Por ello, el software puede ser encontrado en las aplicaciones más simples utilizadas por el ser humano, o en potentes herramientas basadas en técnicas de inteligencia computacional que permiten tomar decisiones a través de un conjunto de reglas de inferencias claramente definidas.

A partir de este panorama, este análisis bibliométrico por coocurrencia tiene como propósito presentar un escenario de las tendencias que se están presentando en el desarrollo de software, a partir de una organización conceptual mediante orientaciones basadas por Cooper [4]. Lo anterior, teniendo en cuenta la complejidad de abordar un análisis

¹ francisco.valle@uniagustiniana.edu.co

² pagaonag@udistrital.edu.co

³ alejandro.guerrero@uniagustiniana.edu.co

bibliométrico de una temática que a lo largo de la historia ha sido referente en prácticamente todas las áreas de conocimiento. Por lo tanto, una de las principales motivaciones del presente estudio se centra en determinar la necesidad del desarrollo de software en diversas áreas del conocimiento, partiendo de su definición, tendencias y campos de aplicación, así como aspectos relacionados con metodologías, arquitecturas, marcos de trabajo, tecnología, seguridad y web semántica.

2. ANTECEDENTES

El software debe integrar factores que permitan un adecuado consumo de datos, así como su representación sobre interfaces visuales que faciliten el consumo de información. Si la prestación del software es visualmente incomprensible, el usuario termina consumiendo información con una potencial huella de carácter contradictorio o tomando decisiones sobre la información sujetas a la incertidumbre de su comprensión.

Las interfaces más populares en la web sobre este consumo de información están al servicio de la semántica. Además, el etiquetado (o vinculación de datos) define los ambientes en los que se va a llevar a cabo la comunicación, con el objetivo de presentar al usuario la consulta que este se encuentre solicitando. Esta situación supone una gran ventaja para las interfaces de desarrollo, puesto que el software en ambientes estandarizados puede definir estructuras de datos menos volátiles que en otros escenarios. Esto implica que, durante el análisis de entornos, el software puede abstraer las formas de presentación que permiten transformar la realidad informática en un lenguaje computacional (por ejemplo: grafos, árboles, matrices, entre otros).

Asociado a estas barreras, dentro de la categoría de procesos de ingeniería de software, podemos encontrar algunos estudios basados en el método de clasificación para resumir parcialmente las consultas dentro de un modelo gráfico de tres capas [5]. Este modelo se encuentra compuesto de documento, semántica y capas de palabras. El modelo gráfico combina tres tipos de información heterogénea: relaciones uno a muchos entre diferentes unidades lingüísticas; similitud, usando superposición de los elementos básicos en las declaraciones; y similitud semántica entre palabras. El método es sobresaliente en términos de la métrica R-Precision (recuperación de información), probado en escenarios que resumen con colecciones de datos semánticos.

Otro elemento de orientación hacia esta categoría es la propuesta realizada por Chaolong *et al.* [6], donde estos autores plantean un proceso de minería de datos y de análisis estadístico en tiempo real del tráfico de flujo de datos, con base en estándares propuestos en múltiples algoritmos existentes. La orientación de este proyecto de investigación se centra en mejorar la interacción entre el humano y la máquina, en la medida que provee una forma de visualizar el tráfico de flujo de datos con perspectivas multidimensionales acordes con los requerimientos del sistema, para el seguimiento, predicción y mantenimiento de la eficiencia en los servicios de tráfico.

Por su parte, estudios como el de Bhagat *et al.* [7] describen técnicas del *clustering* como unas de las más populares en el ámbito de la minería de datos. En su investigación, estos autores recopilan los aspectos más relevantes del trabajo de la comunidad científica frente a los algoritmos para el *clustering* de flujos de información jerárquicos, desde la concepción de los mismos, el análisis y la evaluación de herramientas disponibles. Lo anterior, con el fin de tener un discriminador de parámetros que arroje la selección indicada hacia los problemas de minería de datos.

La anterior demostración de algunas publicaciones en la categoría de procesos de ingeniería de software involucra elementos de las demás categorías expuestas, así como trabajos orientados hacia el desarrollo de *frameworks* propuestos por académicos expertos en el área. En este sentido autores como Kawises y Vatanawood [8], presentan un desarrollo que aborda la problemática de elementos RDF (marco de descripción de recursos) cuando adquieren una gran escala, puesto que sus gráficas generalmente se almacenan en formatos XML o en bases de datos relacionales; lo que lo hace ineficiente en estos escenarios. El uso de algoritmos sofisticados como MapReduce o el *framework* de Hadoop hacen que la labor de transferir grandes volúmenes de datos bajo esta tendencia tenga la convergencia deseada cuando se manejan gráficos a gran escala. La propuesta realiza la conversión del lenguaje XML para el almacenamiento de gráficos en nodos triples que pueden ser leídos por el sistema de ficheros distribuidos de Hadoop (HDFS). Para efectos de consulta, esta información se traduce en nodos triples para el manejo de respuestas con Jena Algebra [8].

Trabajos como el de Kawises y Vatanawood [8] interactúan con la propuesta de “*Using Typography to Expand the Design Space of Data Visualization*”, la cual es una investigación de exploración y expansión sistemática del espacio de diseño de visualización de datos enfocada al papel del texto, entendiendo este último como el causante de brechas al momento de visualizar información sobre marcos de trabajos existentes. La forma práctica en que esta propuesta demuestra esta situación es a través de una revisión multi-disciplinaria que abarca campos como la tipografía y la cartografía, de forma que puedan codificarse interfaces capaces de producir texto a partir de los datos que provienen desde técnicas tipográficas, obteniendo así un campo potencial para el desarrollo de aplicaciones capaces de mapear los atributos que se descubren con estas interfaces, hacia los principios de diseño de formularios para la visualización de datos. El *framework* propio de los autores contempla las principales fases del ciclo del desarrollo de software,

además de la inclusión de seis nuevas técnicas de visualización, con el objetivo de destacar los resultados de la investigación en términos de desempeño y los trabajos futuros en esta área [9].

Los dos estilos de trabajo inmediatamente anteriores son complementados con la revisión de la publicación "*Hybrid Sankey diagrams: Visual analysis of multidimensional data for understanding resource use*", artículo que presenta una propuesta para el mejoramiento de diagramas de Sankey, los cuales se utilizan para visualizar flujos de materiales y energía en varias aplicaciones, de tal manera que logren identificarse dinámicamente las pérdidas e ineficiencias a ser modificadas fuera de los procesos. Dado que este flujo informático sufre cambios cada vez más representativos en las dinámicas de mercado industriales, se requieren adaptaciones sobre los *frameworks* ya existentes, de forma que tengan salida en el mercado conforme se vaya presentando demanda por parte de consumidores, de modo que esta propuesta se centra en obtener un resultado híbrido de diagramas basados en Sankey convencionales y las técnicas avanzadas de visualización de datos [10].

Propuestas como "*RDFa Live Browser Extension: Faceted Presentation and Tooltip Navigation over Linked Data on the Web*", en el marco de la problemática que representa la visualización coherente de los datos, recurren a la tendencia de los datos abiertos vinculados como uno de los estándares para la publicación formal de datos en el dominio de la red que permiten la ágil interpretación semántica de conceptos. Investigaciones recientes en el área se centran en las ventajas computacionales que pueden obtenerse, pero en este escenario hay una propuesta para las personas y sus procesos de aprendizaje, en el sentido que la vinculación de datos mediante una visualización eficiente puede ayudar al descubrimiento de nuevos conceptos enlazados a los ya conocidos. El mecanismo comprende que los usuarios son potencialmente inexpertos en el campo de los datos abiertos enlazados, generando un prototipo para usuarios no técnicos en el ámbito de la navegación y exploración de información bajo esta tendencia [11].

Uno de los servicios que extiende esta idea de ofrecimiento a usuarios y desarrolladores elaborada es presentada en el trabajo "*Linked Data Maps: Providing a Visual Entry Point for the Exploration of Datasets*", donde un aspecto contextual importante para hablar de tendencias en el mundo informático, cuyo carácter novedoso también hace olvidar, es la interacción que tienen los usuarios con respecto a la información y su eventual manejo en la web, puesto que muchas veces se piensa en los procedimientos y las metodologías que otorgan resultados impresionantes, obviando las mecánicas en que los usuarios entrarán en contacto con dichas herramientas. Esta propuesta provee una exploración visual sobre la tendencia de los datos abiertos vinculados (lod), de forma que puedan representarse aquellos recursos que consultan los clientes de manera más inmediata y mitigar la migración de usuarios hacia navegadores tradicionales, en vista de no poder interactuar con los nuevos entornos [12].

Otro de los servicios destacados bajo esta revisión de desarrollo de software, es el expuesto en "*Map4rdf - Faceted Browser for Geospatial Datasets*", el cual expone que la publicación de datos geoespaciales ha representado un gran desafío para la comunidad académica, en el sentido que actualmente existen instituciones que trabajan por estandarizar las dinámicas de compartimiento de datos con relación a este campo. Este desarrollo de software se propone a interpretar dicha estandarización y pasar los contenidos hacia un entorno visual que sea rápidamente interpretable para el usuario, de tal manera que se puedan consumir recursos a través de prácticas recomendadas para proporcionar conocimiento a la comunidad del campo geoespacial [13].

Además del servicio descrito, pueden encontrarse diferentes enfoques para proveer funcionalidades a manera de servicios, tal como se describe en el artículo "*viz-vivo: Towards Visualizations-driven Linked Data Navigation*", el cual presenta una propuesta que consiste en desarrollar una extensión sobre el framework vivo, para efectos de trabajar sobre un marco ya desarrollado, con el fin de ofrecer un nuevo servicio a los usuarios que esta vez les permita realizar una exploración de conocimiento académico a través de un conjunto de visualizaciones orientadas a los datos. Esta extensión se diferencia de otras funcionalidades de la navegación de datos enlazados, en la medida en que provee una dinámica de metáforas para la adquisición de semántica que maneja el framework vivo con sus ontologías [14].

Dado que las categorías sobre tendencias del desarrollo de software tienen como objetivo tratar realidades contemporáneas, tales como el tratamiento informático, uniendo las ramas de procesos de ingeniería de software, *frameworks* y servicios, es posible ahondar sobre estilos arquitectónicos que expliquen el desarrollo de software desde una perspectiva sofisticada, como también la estructura lingüística de dicha información para contar con insumos correspondientes al desarrollo de software esperado. Es con estas dos características, arquitecturas y web semántica, que se brindan y terminan los barridos de literatura necesarios para complementar los horizontes de la revisión, basados en resultados desde la investigación.

Por el lado de las arquitecturas, se destaca la publicación "*Visualization of Hierarchical Transaction Network*", pues este desarrollo nace de la comparación entre las características de los clústeres empresariales y las redes de negocios entre empresas, haciendo posible tener una diagramación que encapsula los comportamientos de las compañías frente a sus movimientos en los negocios con la internacionalización, mediante una manipulación de clústeres representados por nodos y enlaces de múltiples niveles. Se trata de un mecanismo que efectivamente puede proveer al usuario una idea concisa de la dinámica entre compañías con relación a los negocios, con una propuesta ya conocida por los usuarios de este campo [15].

Por su parte, asociado a la web semántica, se encuentran publicaciones como “*Labeled Object Treemap: A New Graph-Labeling Based Technique for Visualizing Multiple Hierarchies*”, que consiste en árboles donde cada nodo está relacionado con una hoja objeto de taxonomía. Sólo una etiqueta se asocia con cada nodo, de manera que la etiqueta transmita la información necesaria, además de las adyacencias y no-adyacencias con otros nodos. El etiquetado de árboles produce vértices con conjuntos disyuntos y adyacencias que coinciden con no-adyacencias, puesto que la técnica incluye en su proceso la minimización asintótica sobre las etiquetas inconsistentes, permitiendo descubrir adyacencia y no-adyacencia de nodos mediante un proceso más fácil que en otros mecanismos conocidos. El mecanismo también logra resolver problemas de cruce de borde y actualización de los mapas de árbol (*treemaps*) sin afectar las características para la visualización de la información jerárquica [16].

A partir de los anteriores referentes, la siguiente sección presenta de manera detallada el método de trabajo utilizado para llevar a cabo esta revisión de la literatura, partiendo de los aspectos metodológicos y los criterios seleccionados para realizar la búsqueda de fuentes sobre el tema.

3. MÉTODO

Para llevar a cabo el presente estudio se utilizó un protocolo de *Systematic Literature Network Analysis* (SLNA) conjugado con los trabajos de Cooper [4], y Kitchenham [17,18], con el objetivo de comprender e identificar los aspectos generales y los trabajos desarrollados en torno al proceso de desarrollo de software. Este análisis permitirá explorar tendencias, áreas de aplicación, metodologías, arquitecturas, marcos de trabajo, entre otros aspectos relacionados, para identificar cómo el software y las distintas estrategias de divulgación son un baluarte dentro de toda organización para el entendimiento de los principios de desarrollo.

La literatura analizada fue seleccionada a través de la metodología de revisión sistemática definida por Kitchenham [17], [18]. En las siguientes secciones se definirán los criterios y aspectos a considerar para el estudio y cómo se realizaron las búsquedas a través de las bases de datos. Bajo este marco, a continuación, se describen los pasos planteados para el proceso SLNA realizado.

Este análisis comprende, según las prácticas definidas por Cooper [4] y Kitchenham [17], [18], las siguientes fases de trabajo: *i)* una fase de planeación, con el propósito de identificar las necesidades, su puesta en marcha, el desarrollo del protocolo, la identificación de palabras claves y la evaluación del protocolo propuesto; *ii)* una segunda fase de conducción del análisis, en la que se identificaron campos de investigación mediante la selección de fuentes primarias, análisis de resúmenes y resultados obtenidos, con el fin de evaluar la pertinencia y la calidad de las fuentes primarias identificadas, así como llevar a cabo una evaluación de las fuentes de acuerdo con los propósitos del estudio; y *iii)* una fase de reporte para categorizar los estudios identificados, construir un informe y posteriormente evaluar los resultados de cara a las necesidades del presente estudio.

A partir de las fases antes descritas, se determinó la base para describir las propuestas de investigación publicadas que fueron tenidas en cuenta para evaluar y orientar este documento tales como: descripción de la estrategia, detalle de los mecanismos disponibles para organizar el análisis, evaluación de resultados obtenidos, entre otras. Finalmente, se contempla una matriz que establece la frontera de las fuentes de información para la bibliometría, a partir de una clasificación detallada de cada artículo seleccionado.

3.1 Fase de preparación

Como estrategia para definir el protocolo de revisión se determinó una serie de mecanismos para dar inicio a la búsqueda. Lo anterior, mediante lenguaje que permitiera identificar aquellos aspectos relevantes previos a la selección de fuentes bibliográficas. El proceso de búsqueda consistió en realizar el levantamiento de literatura que permitiera identificar estudios relacionados con tendencias y principios para el desarrollo de software. La revisión se delimita utilizando un intervalo de tiempo entre 2012 y 2018, periodo en el cual se identificaron visiones acerca del tema de investigación, metodologías utilizadas en el desarrollo de software contemporáneo, así como problemas de interés actual. Para identificar los trabajos de investigación, se consideraron las bases de datos IEEE Explorer, ACM Digital Library, Scopus, Engineering Village y Springer, siendo las de Scopus la de mayor relevancia para este estudio. El proceso de revisión se llevó a cabo desde diciembre de 2017 hasta marzo de 2018.

3.2 Campos de investigación

Para determinar las líneas de profundización sobre la temática, esta revisión se respaldó en publicaciones asociadas con el desarrollo de software, pasando por la creación de interfaces de alto nivel para los usuarios, las métricas para la categorización de conjuntos de datos, entre otras dimensiones: la computación, los lenguajes de consulta, la programación de servicios web y las ciencias de la computación. De esta manera, se determinaron de manera preliminar algunos aspectos de la literatura que permitieran identificar áreas comunes asociadas al desarrollo del software.

En la Figura 1 se despliegan las categorías base para este análisis que aparecen durante la descripción de cada una de las entradas bibliográficas, con el fin de identificar y clasificar las fuentes encontradas.



Figura 1. Categorías de la investigación en desarrollo de software

A partir de esta revisión preliminar, a continuación, se detallan las palabras claves utilizadas. Estas palabras fueron la base para la definición del algoritmo de búsqueda booleano, desplegado en una ecuación que se definió la recopilación de información en bases de datos indexadas, tomando como referente Scopus:

- Desarrollo de software
- Tendencias en desarrollo de software
- Arquitecturas de software
- *Programming languages*
- *Software as a service*
- *Software and security*
- *Technology and software*
- *Emerging technologies*
- *Emerging software development*
- *Software engineering*
- *Software engineering environments*
- *Software engineering process*
- *Software engineering approach*
- *Software engineering educations*
- *Software engineering communities*
- *Software and prototypes*
- *Software and architectures*
- *Software and frameworks*
- *Software and semantic web*
- *Software and health*

3.3 Reportes de consultas

Gestores bibliográficos como Scopus permiten el ingreso de parámetros que permiten filtrar los resultados de búsqueda de acuerdo con los objetivos de adquisición de recursos académicos. De esta manera, se puede establecer una ecuación reconocida por entornos de búsqueda asociados a esta dinámica de consulta, cuyos campos coincidan con los atributos que describen las líneas de investigación planteadas para esta revisión. En este sentido, a continuación, se muestra la ecuación de búsqueda booleana propuesta para esta revisión (Ecuación. 1).

$$\begin{aligned}
 &PUBYEAR AFT 2011 AND \\
 &SUBJAREA(COMP)AND \\
 &KEY(\textit{software development OR} \\
 &\quad \textit{framework OR} \\
 &\quad \textit{programming languages OR} \\
 &\quad \textit{service OR} \\
 &\quad \textit{security OR} \\
 &\quad \textit{emerging technologies OR} \\
 &\quad \textit{software engineering OR} \\
 &\textit{software engineering environments OR} \\
 &\quad \textit{software engineering process OR} \\
 &\quad \textit{software engineering approach OR} \\
 &\quad \textit{software engineering educations OR} \\
 &\quad \textit{software engineering communities OR} \\
 &\quad \textit{prototypes OR} \\
 &\quad \textit{architectures semantic web OR Health})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- *pubyear*: este campo numérico permite indicar el año de publicación o el año desde el cual consultar, por medio de los operadores *is*, *after* y *before*. Como el interés es hacia publicaciones recientes, el argumento de consulta es 2011 para indicar que el periodo es desde 2012 a la actualidad.
- *subjarea*: permite definir que la consulta obtenga resultados asociados a la categoría clave. El argumento *comp* se usa para hacer referencia a los documentos que pertenezcan al campo de *computer science*.
- *key*: permite hacer una búsqueda mezclada entre las palabras clave dadas por el autor, los conceptos clave de la publicación, el nombre comercial o la manufacturación de los documentos; es decir, permite ingresar las palabras clave de búsqueda. Para esta ecuación de búsqueda se utilizaron los términos generales obtenidos desde las categorías para investigación:
 - *software development*
 - *framework*
 - *programming languages*
 - *service*
 - *security*
 - *emerging technhnologies*
 - *software engineering*
 - *software engineering environments*
 - *software engineering process*
 - *software engineering approach*
 - *software engineering educations*
 - *software engineering communities*
 - *prototypes*
 - *architectures*
 - *semantic web*
 - *health*

Esta ecuación de búsqueda se utilizó mediante el gestor bibliográfico Scopus, con el objetivo de tener noción sobre los resultados de las investigaciones reconocidas por Elsevier que aceptan este tipo de características. La Figura. 2 presenta el resultado arrojado por esta ecuación en Scopus. Por su parte, la Figura 3 muestra el número de documentos identificados por autor.

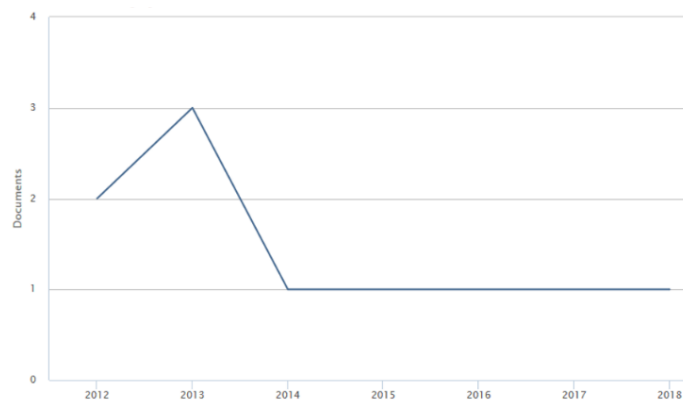


Figura 2. Resultado de búsqueda por año

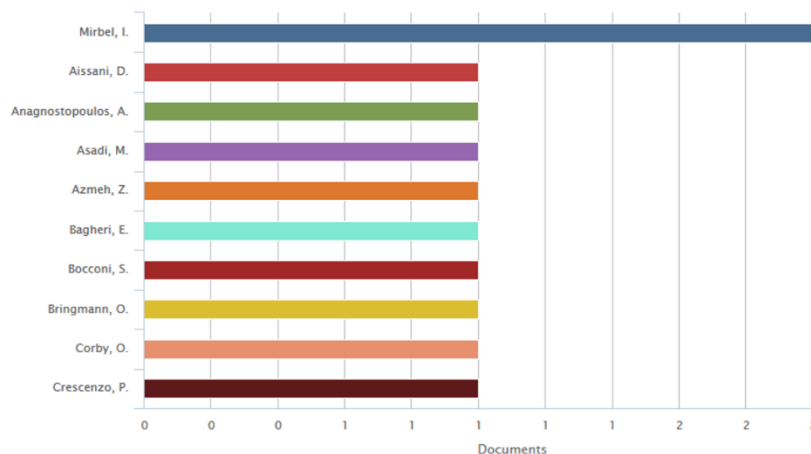


Figura 3. Resultado de búsqueda por autor

La Figura 4 presenta el número de artículos identificados a partir de la afiliación institucional de cada autor. En La Figura 5 se exhibe la relación del número de documentos por país.

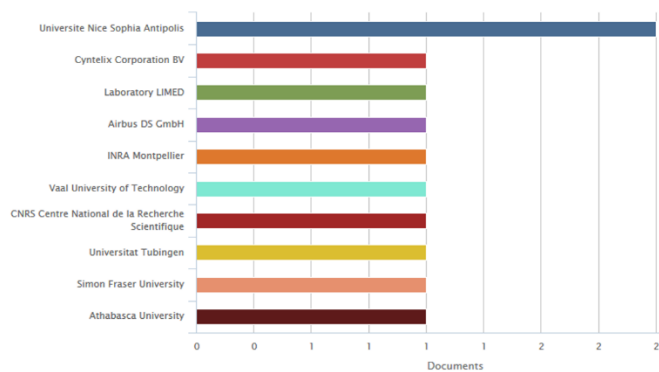


Figura 4. Resultados de búsqueda por institución

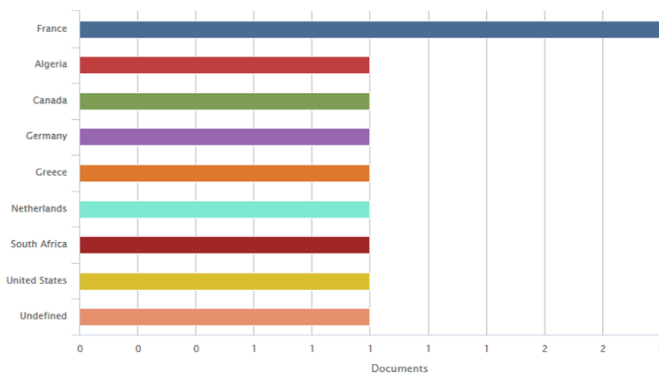


Figura 5. Resultados de búsqueda por país

Por su parte, la Figura 6 es una representación de la clasificación de los documentos por el área de conocimiento a la cual pertenecen. Dentro de estos, el mayor porcentaje corresponde a artículos de conferencia (80 %), mientras que 10% hacen parte de artículos de revisión y artículos en edición para publicación. Además, en la Figura. 7 se presenta la relación de artículos de acuerdo con las diferentes sub-áreas de conocimiento relacionadas con el desarrollo de software.

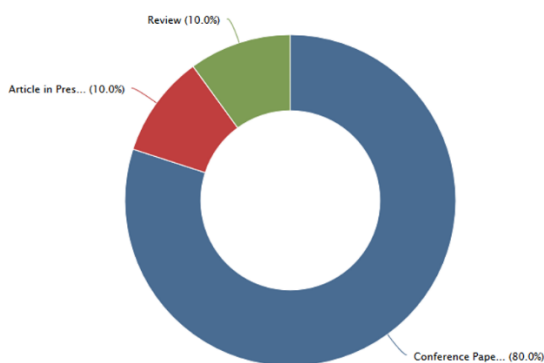


Figura 6. Resultados por área de conocimiento

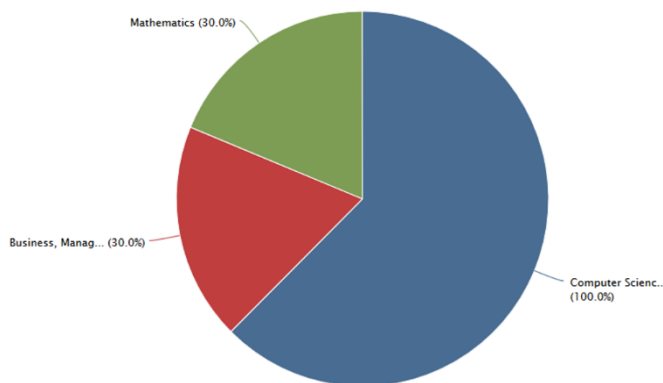


Figura 7. Resultados por sub-área de conocimiento

Es importante aclarar que este estudio se realizó a través del gestor bibliográfico Scopus de Elsevier, de manera que otro tipo de gestores bibliográficos –no necesariamente afines a esta institución– pueden arrojar otro tipo de resultados al análisis de la ecuación de búsqueda. La idea de utilizar un gestor bibliográfico como Scopus es la posibilidad de interactuar con las herramientas de análisis de resultados sobre el comportamiento de la ecuación para cualquier tipo de investigación relacionada con la revisión de literatura. El siguiente apartado presenta los resultados obtenidos de acuerdo con los criterios de análisis definidos en esta sección metodológica

4. RESULTADOS

4.1 Bases de datos

- *ACM Digital Library*: es la sociedad de informática educativa y científica más grande del mundo, ofrece recursos que hacen avanzar la informática como ciencia y profesión. ACM ofrece la principal biblioteca digital del campo informático y sirve a sus miembros y a la profesión informática con publicaciones, conferencias y recursos profesionales de vanguardia. Fuente: <https://www.acm.org/about-acm>, dirección: <https://dl.acm.org/>.
- *IEEE Xplore Digital Library*: es un recurso poderoso para el descubrimiento de contenido científico y técnico publicado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y sus socios de publicación. Esta base proporciona acceso web a más de cuatro millones de documentos de texto completo de algunas de las publicaciones más importantes del mundo en ingeniería eléctrica, informática y electrónica. Fuente: <https://IEEEExplore.IEEE.org/Xplorehelp/#/overview-of-IEEE-xplore/about-IEEE-xplore>, dirección: <http://IEEEExplore.IEEE.org/>.
- *Springer International Publishing AG*: es una cartera científica, técnica y médica líder a nivel mundial, que brinda contenidos de calidad a investigadores en instituciones académicas, instituciones científicas y departamentos corporativos de I+D, a través de información, productos y servicios innovadores. Fuente: <https://www.springer.com/la/about-springer>, dirección: <https://link.springer.com/>.
- *ScienceDirect*: plataforma líder de literatura académica revisada por pares en Elsevier. Las bibliotecas e instituciones universitarias ofrecen acceso ScienceDirect a sus comunidades de investigadores y académicos. Investigadores, profesores, estudiantes, profesionales de la salud y de la información utilizan ScienceDirect para mejorar la forma en que buscan, descubren, leen, entienden y comparten investigaciones académicas. ScienceDirect combina publicaciones autorizadas, científicas, técnicas y de salud de texto completo con una funcionalidad inteligente e intuitiva, para que los usuarios puedan mantenerse informados en sus campos y puedan trabajar de manera más efectiva y eficiente. Fuente: <https://www.elsevier.com/solutions/sciencedirect>, dirección: <https://www.sciencedirect.com/>.
- *Scopus*: es la base de datos más grande de citas y resúmenes de literatura revisada por pares: publicaciones científicas, libros y actas de conferencias, brindando una visión global de la producción de investigación en el mundo en los campos de la ciencia, la tecnología, la medicina, las ciencias sociales y las artes y las humanidades. Scopus presenta herramientas inteligentes para rastrear, analizar y visualizar la investigación. Fuente: <https://www.elsevier.com/solutions/scopus>, dirección: <https://www.scopus.com/>.
- *Elsevier*: ayuda a los investigadores a hacer nuevos descubrimientos, colaborar con sus colegas y brindarles el conocimiento que necesitan para encontrar fondos. Ayuda a gobiernos y universidades a evaluar y mejorar sus estrategias de investigación. Su objetivo es ampliar los límites del conocimiento en beneficio de la humanidad. Fuente: <https://www.elsevier.com/about>, dirección: <https://www.elsevier.com/>.
- *Semantic Scholar*: es un motor de búsqueda académico gratuito, sin fines de lucro, del Allen Institute for Artificial Intelligence (AI2). Fuente y dirección: <https://www.semanticscholar.org/>.
- *Research Gate*: construido por científicos, para científicos. Su misión es conectar el mundo de la ciencia y hacer que la investigación esté abierta a todos. Fuente: <https://www.researchgate.net/about>, dirección: <https://www.researchgate.net/>.
- *CEUR Workshop Proceedings*: servicio gratuito de publicación de acceso abierto en *Sun site Central Europe*, operado bajo el paraguas de *rwth Aachen University*. Fuente y dirección: <http://ceur-ws.org/>.

4.2 Criterios de revisión

4.2.1 Criterios para selección

Inicialmente, tras realizar el diseño de la ecuación de búsqueda, es posible interpretar que las categorías de investigación definidas antes de la recolección de entradas bibliográficas fueron el primer indicio en función de la selección de recursos para la revisión de literatura, debido a que son la ramificación del tema principal de investigación y orientaron la búsqueda hacia contextos más definidos. Otra consideración importante es el tipo de recursos que se tuvo en cuenta para la revisión, dado que la concentración estuvo en artículos científicos, con el ánimo

de agilizar el hallazgo de materiales en bases de datos indexadas, cuyo contenido fuera legible por medio del acceso a los mismos con formatos de documentos portables. En definitiva, la selección de documentos viene de dos ciclos de búsqueda guiados por una retroalimentación (expuesta por los horizontes de tiempo), donde los recursos satisfagan las condiciones estudiadas desde la ecuación de búsqueda planeada, su contenido sea coherente con su propuesta de publicación y su relevancia para el análisis esté demostrada con sus aportes y/o conclusiones.

4.2.2 Criterios para exclusión

Como base para la exclusión se omitieron recursos con un periodo de publicación más antiguo que el propuesto, dado que en la actualidad sería posible obtener una versión más reciente o una confrontación de la propuesta dentro de los gestores bibliográficos; esto con el objetivo de contar con conclusiones más pertinentes al momento de presentar la investigación. Además, se omitieron recursos cuyo cuerpo del documento no relacionara las palabras clave definidas desde la búsqueda con el contenido, de manera que se omitieron los documentos con contenido poco relevante para la investigación, medido a través de su desarrollo de ideas o documentación de resultados. En la Figura 8 se expone el gráfico que relaciona la proporción de publicaciones con respecto a las categorías de investigación identificadas en la Figura. 1. de esta manera, se puede estudiar el desempeño de dichas categorías con respecto a su repercusión en la investigación y su papel durante el análisis de la literatura seleccionada.

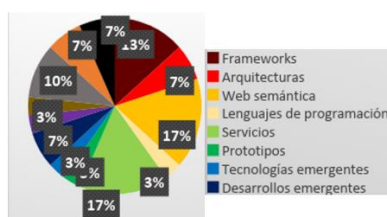


Figura 8. Proporción de registros identificados según la categoría de investigación.

En la Figura 9 se presenta el gráfico que relaciona la proporción de artículos obtenidos, según la revista digital e indexada de origen, de forma que pueda entenderse la construcción de la revisión de literatura teniendo en cuenta la contribución de cada gestor de publicaciones y la diversidad de contenidos que se manejan dentro del análisis en cada entrada bibliográfica.

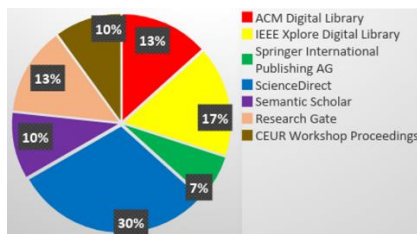


Figura 9. Proporción de artículos analizados según revista de origen

Con base en esta dinámica de análisis, se encontraron 153 estudios preliminares, de los cuales 75 fueron seleccionados. Los criterios que se determinaron para su selección partieron de las palabras clave utilizadas relacionadas directamente con las categorías del tema de estudio. Los 78 trabajos restantes fueron descartados porque no ofrecían una contribución considerable al tema de investigación. Es importante aclarar que, aunque las publicaciones descartadas presentaban temas referentes al área en general, como por ejemplo implementación de estrategias de *harvesting* en diferentes escenarios, aplicaciones de *Social Network*, sistemas recomendadores, modelos de seguridad, estrategias de optimización de consultas en *Sparql*, entre otros aspectos, estos no presentaban una relación estrecha con el tema de investigación.

4.3 Resultados obtenidos y principales hallazgos

Inicialmente, uno de los principales hallazgos partió de la visión organizacional del desarrollo de software, logrando identificar ejes emergentes orientados a la innovación informática y una gran necesidad al tratamiento de grandes volúmenes de datos. Lo anterior se debe a que, convencionalmente, el desarrollo de software encuentra en sus trabajos soluciones de abstracción informática que, para el cambio en la demanda del contexto, se vuelven obsoletas, entendiendo la demanda como el agente que modela el comportamiento de los datos en cada marca de tiempo que estudia la comunidad científica.

Las discusiones iniciales permitieron observar que el tratamiento de la información hace parte de las técnicas usadas para la interpretación de los datos en formatos reproducibles en múltiples escenarios; esto con el ánimo de lograr articular dicho concepto con el desarrollo de software y estudiar la escalabilidad de las investigaciones con respecto a las soluciones a nivel computacional asociados con: riesgos de redundancia, inconsistencia, vulnerabilidad, entre

otros temas comunes en el ámbito informático. Esta interacción también permitió trazar las categorías esenciales para la investigación, tal y como se pudo evidenciar en la ramificación de áreas de conocimiento propuesta en la Figura 1.

Lo anterior significa que el esfuerzo por hallar las directrices de la investigación se tradujo en ubicar al desarrollo de software como el eje de ramificación hacia los campos más representativos del tratamiento emergente de la información, así como la manera en que las tendencias en términos de producción de herramientas tienen un efecto significativo durante la interpretación de los datos.

4.3.1 Tendencias

Con base en el número de artículos identificados y relacionados con el presente análisis, se planteó una matriz de clasificación que permitió relacionar y categorizar las diversas áreas de aplicación asociadas al desarrollo de software. Es así como la Figura 10 presenta las tendencias más representativas de la investigación en el área, en tanto arrojan las ideas principales que resultan de la interacción de los conceptos definidos desde las categorías de investigación con aquellos elementos de la comunidad científica, visto desde el análisis de las entradas bibliográficas.

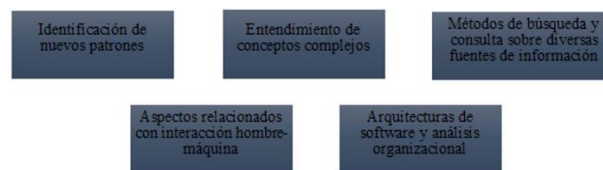


Figura 10. Tendencias de la investigación

Estas tendencias son resultados de la articulación de los conceptos propuestos desde las categorías de investigación, con los análisis obtenidos desde el análisis de la literatura. Esta revisión demuestra la constante interacción de los usuarios hacia el desarrollo de software, por medio de artefactos en código fuente (tales como prototipos, servicios, marcos de trabajo, arquitecturas, entre otros), permitiendo una lectura natural de los datos involucrados en la dinámica, tal como sucede con la web semántica y el análisis de grandes volúmenes de datos.

4.3.2 Apuestas

En la Figura 11 se pueden observar los momentos esenciales desde la inclinación de los artículos por brindar soluciones desde el campo del desarrollo de software, hasta las tendencias de producción más sostenibles identificadas durante la investigación. Esta evidencia es la representación de cómo los mecanismos y los artefactos brindan resultados que unen elementos del desarrollo del software con el entendimiento de los usuarios (esto haciendo referencia a modelos basados en internet de las cosas, procesos de ingeniería de software, desarrollos y tendencias emergentes, entre otros), de forma que los artefactos de software resultantes tengan la posibilidad de escalarse en múltiples contextos, no solo horizontalmente, como ocurría con el desarrollo de software plano.

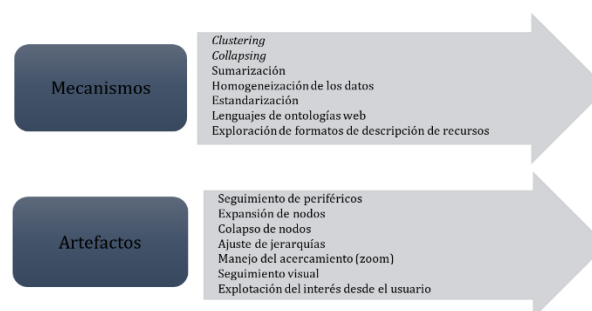


Figura 11. Inclinaciones en desarrollo de software identificadas

Las inclinaciones expuestas en la Figura 11, llevan al proceso de análisis a considerar afirmaciones que orienten las siguientes investigaciones bajo las líneas de investigación descritas a continuar con los principales desafíos que expone la comunidad académica a través de sus publicaciones. Las afirmaciones resultado de esta investigación que operan como apuestas de investigación futura son:

- Todo trabajo que requiera la manipulación de grandes volúmenes de datos necesita de un proceso analítico de los datos (*visual analytics*).
- La necesidad de un mecanismo efectivo en este campo es más evidente conforme crece la generación de información digital.
- Los mecanismos deben contar con desempeños aún más allá de la visualización coherente de los datos, tales como: filtrado, agregación y profundización sobre la misma información.

Las estructuras de datos más inmediatas para pensar en el análisis de los datos son los grafos y las redes, cuya magnitud crece en varios dominios, lo que impide la exploración visual de los datos y, eventualmente, una coherente visualización de grandes volúmenes de datos.

4.3.3 Revistas de la disciplina

Tal como se describió en la sección metodológica mediante la generación de la ecuación de búsqueda para la discriminación preliminar de resultados, se identificaron dentro de los motores de Elsevier y Scopus entradas bibliográficas y localización en bases de datos académicas de eventos que publicaron cada uno de los recursos analizados documentalmente. Esta asociación de metadatos relacionados con los recursos estudiados puede entenderse mediante la lectura de la matriz de revisión, donde se consignan tanto las bases de datos académicas como las fuentes (o eventos o nombre de las conferencias) de las que hicieron parte los autores para proponer sus investigaciones.

En la Tabla 1 se presenta la relación de artículos identificados de acuerdo con el motor de búsqueda. Esta tabla presenta proporciones de 18 y 50% para las revistas de ScienceDirect e IEEE Xplore, respectivamente, lo que refleja la participación de dichas publicaciones en eventos de respaldo indexado, ya sea reconocido por Elsevier o por IEEE propiamente. En la Tabla 2 se realiza una discriminación del tipo de revista y/o evento relacionado.

Tabla 1. Artículos identificados por motor de búsqueda

Fuente	Artículos	Proporción (%)
AMC Digital Library	4	8
IEEE Xplore Digital Library	25	50
Springer International Publishing AG	2	4
ScienceDirect	9	18
Semantic Scholar	3	6
Research Gate	4	8
CEUR Workshop Proceedings	3	6
Total	50	100%

En la Tabla 2 se evidencian que entre 20 y 7% de las publicaciones fueron obtenidas de fuentes como *Procedia Computer Science* y *15th International Conference on Computer and Information Science*, respectivamente, dejando con una proporción de 3 % a cada una de las demás fuentes de publicación; algo que sugiere una estrecha relación entre la obtención de recursos utilizando métodos propuestos por Elsevier y los conocidos por IEEE Xplore.

Tabla 2. Artículos identificados por fuente de publicación

Fuente	Artículos	Proporción (%)
<i>Annals of Pure and Applied Mathematics</i>	1	2
<i>9th Forum Media Technology 2016</i>	1	2
<i>Lecture Notes in Business Information Processing</i>	1	2
<i>4th Brazilian Conference on Intelligent Systems (bracis)</i>	1	2
<i>10th International Conference on Semantic Computing (ICSC)</i>	1	2
<i>SIGIR Workshop on Graph Search and Beyond '15</i>	1	2
<i>1st International Workshop on Graph Search and Beyond co-located with The 38th Annual SIGIR</i>	1	2
<i>15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)</i>	4	8
<i>5th International Conference on Information Visualization Theory and Applications (IVAPP)</i>	1	2
<i>Computational Intelligence and Neuroscience</i>	1	2
<i>Procedia Computer Science</i>	6	12
<i>Procedia Engineering</i>	1	2
<i>She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation</i>	1	2
<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	1	2
<i>27th Annual acm Symposium on Applied Computing</i>	1	2
<i>Applied Mathematics & Information Sciences</i>	1	2
<i>4th International Workshop on Intelligent Exploration of Semantic Data</i>	1	2
<i>13th International Semantic Web Conference</i>	1	2
<i>Lecture Notes in Computer Science (subseries in Artificial Intelligence and Bioinformatics)</i>	1	2
<i>pmod workshop</i>	1	2
<i>2nd International Workshop on Visualization and Interaction for Ontologies and Linked Data</i>	1	2
<i>The Semantic Web: eswc 2012 Satellite Events</i>	1	2
<i>5th International Conference on Consuming Linked Data</i>	1	2
<i>International Joint Conf. on Knowledge Discovery, Engineering and Management</i>	1	2
<i>IEEE Access</i>	15	30
<i>IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing</i>	1	2
<i>15th International Conf. on Software Engineering Research, Management and Applications (sera)</i>	1	2
<i>IEEE Transactions on Software Engineering</i>	1	2
Total	50	100

Finalmente, la Tabla 3 presenta la clasificación de estos artículos y el año de publicación de cada uno de ellos.

Tabla 3. Artículos identificados por año y área de conocimiento

Título	Año	Área
<i>Labeled Object Treemap: A New Graph-Labeling Based Technique for Visualizing Multiple Hierarchies</i>	[16]	2017 Web semántica
<i>Visual Exploration of Hierarchical Data Using Degree-of-Interest Controlled by Eye-Tracking</i>	[51]	2016 Tecnologías emergentes
<i>DESiRe: A Dynamic Approach for Exploratory Search Results Recommendation</i>	[44]	2015 Prototipos
<i>Visualization of Hierarchical Transaction Network</i>	[15]	2016 Arquitecturas
<i>A Development of RDF Data Transfer and Query on Hadoop Framework</i>	[8]	2016 Frameworks
<i>Eye-tracking Investigation During Visual Analysis of projected Multidimensional Data with 2D Scatterplots</i>	[29]	2014 Desarrollos emergentes
<i>EyeTribe Tracker Data Accuracy Evaluation and Its Interconnection with Hypothesis Software for Cartographic Purposes</i>	[46]	2016 Desarrollos emergentes
<i>Visualizing the Information of a Linked Open Data Enabled Research Information System</i>	[28]	2014 Web semántica
<i>MEMO GRAPH: An Ontology Visualization Tool for Everyone</i>	[31]	2016 Enfoques de ingeniería de software
<i>Visualizing Large-scale Linked Data with Memo Graph</i>	[32]	2017 Enfoques ingeniería de software
<i>Visualization Application Development for Mosque Financial Report Using Linked Data and Crowd-sourcing</i>	[47]	2015 Entornos ingeniería de software
<i>Semantic Links Using SKOS Predicates</i>	[24]	2017 Web semántica
<i>Research on Visualization of Multi-Dimensional Real-Time Traffic Data Stream Based on Cloud Computing</i>	[6]	2016 Procesos de ingeniería de software
<i>Penalty Parameter Selection for Hierarchical Data Stream Clustering</i>	[7]	2016 Procesos de ingeniería de software
<i>Using Typography to Expand the Design Space of Data Visualization</i>	[9]	2016 Frameworks
<i>Hybrid Sankey diagrams: Visual analysis of multidimensional data for understanding resource use</i>	[10]	2017 Frameworks
<i>Using Hierarchical Edge Bundles to Visualize Complex Ontologies in GLOW</i>	[34]	2012 Web semántica
<i>Scalable Visualization of Semantic Nets using Power-Law Graphs</i>	[36]	2014 Educación ingeniería de software
<i>Linked Data Maps: Providing a Visual Entry Point for the Exploration of Datasets</i>	[12]	2015 Servicios
<i>A Visual Summary for Linked Open Data sources</i>	[26]	2014 Arquitecturas
<i>rdf:SynopsViz - A Framework for Hierarchical Linked Data Visual Exploration and Analysis</i>	[19]	2014 Frameworks
<i>Map4rdf - Faceted Browser for Geospatial Datasets</i>	[13]	2012 Servicios
<i>VIZ-VIVO: Towards Visualizations-driven Linked Data Navigation</i>	[14]	2016 Servicios
<i>Sgvizler: A JavaScript Wrapper for Easy Visualization of SPARQL Result Sets</i>	[52]	2015 Lenguajes de programación
<i>Towards a Linked-Data based Visualization Wizard</i>	[23]	2014 Servicios
<i>PersonLink: A Multilingual and Multicultural Ontology Representing Family Relationships</i>	[33]	2015 Comunidades
<i>A Suite of Object Oriented Cognitive Complexity Metrics</i>	[43]	2018 Enfoques ingeniería de software
<i>Overview of Slicing and Feedback Techniques for Efficient Verification of UML/OCL Class Diagrams</i>	[50]	2018 Procesos de ingeniería de software
<i>Investigating Software Standards: A Lens of Sustainability for Software Crowdsourcing</i>	[42]	2018 Arquitecturas
<i>Competition-Based Crowdsourcing Software Development: A Multi-Method Study from a Customer Perspective</i>	[53]	2017 Comunidades
<i>Queueing-Theory-Based Models for Software Reliability Analysis and Management</i>	[35]	2017 Procesos de ingeniería de software
<i>A framework of software reusing engineering management</i>	[55]	2017 Frameworks
<i>A Systematic Mapping Study of Software Development With GitHub</i>	[27]	2017 Comunidades
<i>Software Standards and Software Failures: A Review With the Perspective of Varying Situational Contexts</i>	[40]	2017 Entornos ingeniería de software
<i>Calculating Completeness of Agile Scope in Scaled Agile Development</i>	[21]	2018 Procesos de ingeniería de software
<i>Taxonomy of Factors Causing Integration Failure during Global Software Development</i>	[56]	2017 Arquitecturas
<i>Build Software or Buy: A Study on Developing Large Scale Software</i>	[49]	2017 Tecnologías emergentes
<i>Regression Testing of Database Applications Under an Incremental Soft. Develop. Setting</i>	[48]	2017 Arquitecturas
<i>Integrated Approach to Software Defect Prediction</i>	[30]	2017 Frameworks
<i>SPIIMM: Toward a Model for Software Process Improvement Implementation and Management in Global Software Development</i>	[39]	2017 Frameworks
<i>Achieving Flexible and Self-Contained Data Protection in Cloud Computing</i>	[41]	2017 Seguridad
<i>Decision Support System for Risk Assessment and Management Strategies in Distributed Software Development</i>	[22]	2017 Servicios
<i>Impact of Personality on Task Selection in Crowdsourcing Soft. Develo.: A Sorting Approach</i>	[54]	2017 Enfoques ingeniería de software
<i>Ontology Based Multiagent Effort Estimation System for Scrum Agile Method</i>	[20]	2017 Frameworks
<i>Practices for software integration success factors in GSD environment</i>	[37]	2016 Procesos de ingeniería de software
<i>Influence of outliers on analogy-based software development effort estimation</i>	[45]	2016 Procesos de ingeniería de software

4.3.4 Análisis de tendencias a través del mapeo de ciencias dirigidos a la Industria 4.0

A partir de la revisión de los 2.000 artículos más citados de Scopus en el campo del desarrollo de software y publicados entre 2012 y 2018, se construye el mapa científico (*science mapping*) con las principales temáticas que marcan tendencia en las investigaciones basadas en datos de coocurrencia (Figura 12). De esta manera, se forma un mapa basado en distancia en el que la separación entre dos elementos refleja la fuerza de la relación entre ellos, donde una menor extensión indica un vínculo más fuerte. Esto facilita la identificación de grupos de elementos relacionados (clústeres).

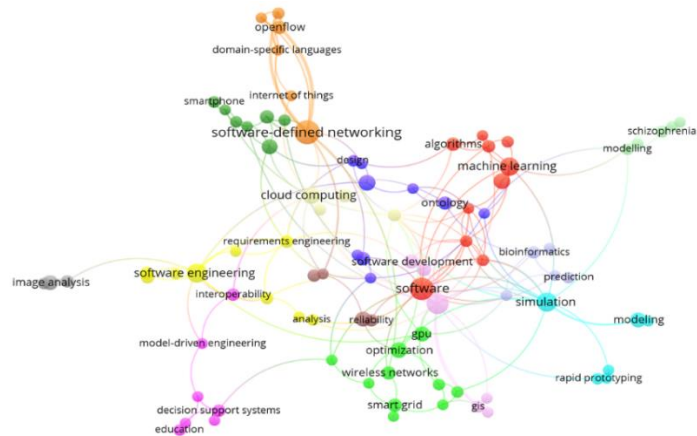


Figura 12. Science mapping con las palabras clave *Develop* y *Software*

A partir del análisis de coocurrencia se identifican 14 clústeres que corresponden a las palabras claves más destacadas. Estos clústeres nos permiten reconocer que las investigaciones en el desarrollo del software se enfocan en su relación con la industria. En cuanto a la forma en que se distribuyen para efectos investigativos, se destaca el software de código abierto y la manera cómo este desarrolla las líneas de producción de software. Los 14 clústeres identificados se mencionan a continuación:

- *Machine learning* (rojo)
- *Smart grid* (verde)
- *Big data* (azul)
- *Software engineering* (amarillo)
- *Software agents* (fucsia)
- *Software product lines* (verde oscuro)
- *Simulation* (celeste)
- *Internet of things* (naranja)
- *Open source* (rosado)
- *Modelling* (verde claro)
- *Bioinformatics* (azul claro)
- *Cloud computing* (amarillo claro)
- *Software-defined networks* (marrón)
- *Image analysis* (gris)

Referente al desarrollo de software enfocado en la industria (Figura 13), según las investigaciones revisadas, podemos establecer que esta gira en torno a ejes claves como la inteligencia artificial (clústeres 1 y 5), el análisis de grandes volúmenes de datos (clúster 2), el internet de las cosas (clúster 8), la computación en la nube (clústeres 12 y 13) y el procesamiento de imágenes (clúster 14).

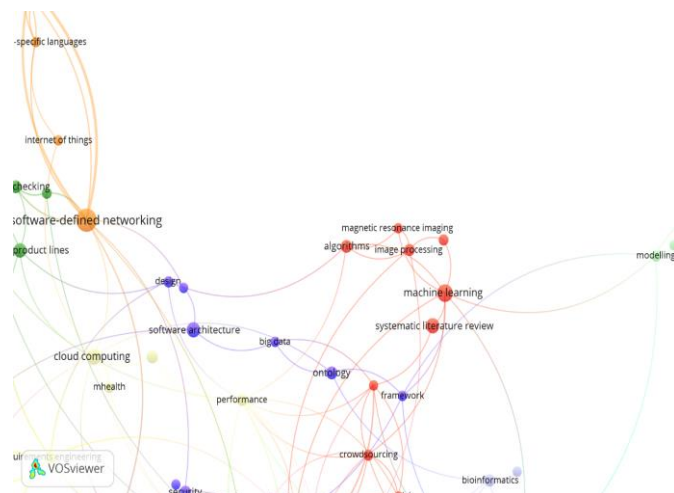


Figura 13. Software e industria

5. CONCLUSIONES

Las tendencias para la adquisición de software durante los últimos años han cambiado significativamente a raíz de la oferta de servicios a través de internet. De un lado, se presentan movimientos a favor de la distribución del software

sin restricciones (software libre), por otro, en respaldo a la forma tradicional de adquirirlo (software propietario). A partir de estas opciones de distribución de software y las diferencias marcadas entre ambas, se han presentado cambios en la regulación comercial y legal del mercado de software, así como en su aplicación dentro de diversos entornos de trabajo.

Considerando esta realidad, uno de los aspectos relevantes a tener en cuenta respecto a las tendencias de desarrollo de software está directamente relacionado con el tiempo de vida que tienen los desarrollos de software en el contexto informático. Lo anterior, teniendo en cuenta la alta demanda por parte de consumidores pensando en los escenarios de aplicación que pueden variar desde un sector académico o científico –donde todo desarrollo viene sustentado por pares académicos en revistas indexadas– a un sector comercial que requiere soluciones de desarrollo mediante metodologías ágiles para el lanzamiento de productos al mercado. Por su parte, la transformación y el valor que han tomado los datos ha dejado de seguir comportamientos lineales, puesto que actualmente la realidad supone nuevos desafíos para el hardware y el software que traten de ofrecer funcionalidades o servicios a los usuarios corporativos para hacer análisis de grandes volúmenes de datos con el propósito de llevar a cabo mejoras en sus servicios.

Algunos de los resultados analizados en este análisis bibliométrico presentan tendencias orientadas hacia herramientas que permitan adaptarse a la volatilidad de la gran cantidad de datos presentes en la web. Lo anterior, mediante la posibilidad de escalar, extender o propagar características que surjan con respecto al paso del tiempo y de las tecnologías, de forma que sus desarrollos no presenten un alto índice de riesgo de obsolescencia y que participen además de nuevas generaciones para adoptar nuevas formas de resolver el manejo informático. Esta realidad es innegable en la medida que los autores reconocen la volatilidad de los datos y adoptan medidas de contingencia para que sus desarrollos sean tenidos en cuenta por el mundo del software durante mucho más tiempo.

Este tipo de tendencias ha generado otra área marcada de desarrollo orientada a evaluar las propiedades de la Web mediante estrategias que permiten postular formas de estandarizar el intercambio de conocimiento, como es el caso de la web semántica, las ontologías web, los marcos de descripción de recursos, los datos abiertos enlazados, entre otras. De esta manera se busca que los desarrollos basados en software tengan métodos de capturar, recolectar e interpretar los datos con los que disponen, para efectos de generar un código funcional que interactúe con interfaces de alto nivel con los usuarios.

Se observa que los futuros desarrolladores de software deberán presentar habilidades de programación para sistemas embebidos, que tengan presente los avances en inteligencia artificial, el auge que presentan los dispositivos IoT, y la computación en la nube.

Es innegable que una fuerte tendencia en el desarrollo de software es determinar estrategias para gestionar grandes volúmenes de datos y al mismo tiempo articular los mecanismos para su análisis mediante técnicas de visualización de datos. Lo anterior, con el propósito de ofrecer soluciones a las organizaciones para la toma de decisiones con base en el análisis de datos, entre otros aspectos relacionados con el campo de las ciencias de los datos. Esto implica la vinculación de diversas técnicas de inteligencia computacional con el fin de lograr una mejor abstracción de la realidad de los datos a analizar.

REFERENCIAS

- [1] T. O'Reilly, "What Is Web 2.0? Design Patterns and Business Models for the Next Generation of Software", *Citeulike.org*, 2018. [Online]. Available: <http://www.citeulike.org/group/2924/article/1816085>. [Accessed: 23-May-2018].
- [2] UNCTAD, "Informe sobre la economía de la información: La industria del software y los países en desarrollo", 2018. [Online]. Available: http://unctad.org/en/Pages/DIAE/World%20Investment%20Report/WIR2012_WebFlyer.aspx. [Accessed: 23-May-2018].
- [3] F. Landini, "Technology, property rights and organizational diversity in the software industry", *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 23, no. 2, pp. 137-150, 2012.
- [4] H. Cooper, "Organizing knowledge syntheses: A taxonomy of literature reviews", *Know. in Soc.*, vol. 1, no. 1, 104-126, 1988.
- [5] K. Sakamoto, H. Shibuki, T. Mori y N. Kando, "Fusion of heterogeneous information in graph-based ranking for query-biased summarization", *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 1393, pp. 19-22, 2015.
- [6] J. Chaolong, W. Hanning y W. Lili, "Research on Visualization of Multi-Dimensional Real-Time Traffic Data Stream Based on Cloud Computing", *Procedia Engineering*, vol. 137, pp. 709-718, 2016.
- [7] A. Bhagat, N. Kshirsagar, P. Khodke, K. Dongre y S. Ali, "Penalty Parameter Selection for Hierarchical Data Stream Clustering", *Procedia Computer Science*, vol. 79, pp. 24-31, 2016.
- [8] J. Kawises y W. Vatanawood, "A development of RDF data transfer and query on Hadoop Framework", *2016 IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, 2016.
- [9] R. Brath y E. Banissi, "Using Typography to Expand the Design Space of Data Visualization", *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation*, vol. 2, no. 1, pp. 59-87, 2016.
- [10] R. Lupton y J. Allwood, "Hybrid Sankey diagrams: Visual analysis of multidimensional data for understanding resource use", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 124, pp. 141-151, 2017.
- [11] A. Rocha y C. Prazeres, "RDFa Live Browser Extension: Faceted Presentation and Tooltip Navigation over Linked Data on the Web", *Business Information Systems Workshops*, pp. 285-292, 2015.

- [12] F. Valsecchi, M. Abrate, C. Bacciu, M. Tescony y A. Marcheti, "Linked Data Maps: Providing a Visual Entry Point for the Exploration of Datasets", *4th Inter. Workshop on Intelligent Exploration of Semantic Data*, vol. 1472, pp. 361-365, 2015.
- [13] A. de León, F. Wisniewski, B. Villazón-Terrazas y O. Corcho. "Map4rdf - Faceted Browser for Geospatial Datasets", *PMOD workshop*, pp. 1-5, 2012.
- [14] M. Javed, S. Payette, J. Blake y T. Worrall, "VIZ-VIVO: Towards Visualizations-driven Linked Data Navigation", *2nd International Workshop on Visualization and Interaction for Ontologies and Linked Data*, vol. 1704, pp. 80-92, 2016.
- [15] K. Arimoto y H. Watanabe, "Visualization of Hierarchical Transaction Network", *15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, pp. 1-4, 2016.
- [16] M. Jadeja y R. Muthu, "Labeled Object Treemap: A New Graph-Labeling Based Technique for Visualizing Multiple Hierarchies", *Annals of Pure and Applied Mathematics*, vol. 13, no. 1, pp. 49-62, 2017.
- [17] B. Kitchenham, *Procedures for performing systematic reviews*. Keele: Keele University, pp. 1-26, 2018.
- [18] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey y S. Linkman, "Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review", *Information and Software Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 7-15, 2009.
- [19] N. Bikakis, M. Skoufros y G. Papastefanatos, "rdf: SynopsViz - {A} Framework for Hierarchical Linked Data Visual Exploration and Analysis", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8798, pp. 292-297.
- [20] M. Adnan y M. Afzal, "Ontology Based Multiagent Effort Estimation System for Scrum Agile Method", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25993-26005, 2017.
- [21] S. Amjad, N. Ahmad, T. Saba, A. Anjum, U. Manzoor, M. A. Balubaid y S. U. Malik, "Calculating Completeness of Agile Scope in Scaled Agile Development", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 5822-5847, 2018.
- [22] A. Aslam, N. Ahmad, T. Saba, A. S. Almazayad, A. Rehman, A. Anjum y A. Khan, "Decision Support System for Risk Assessment and Management Strategies in Distributed Software Development", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20349-20373, 2017.
- [23] G. A. Atemez y R. Troncy, "Towards a Linked-Data based Visualization Wizard", *5th International Conference on Consuming Linked Data*, vol. 1264, pp. 1-12, 2014.
- [24] R. Ávila, S. Santos, D. Araújo, V. Vidal y J. Macêdo, "Semantic Links Using SKOS Predicates", *Procedia Computer Science*, 112, pp. 467-473, 2017.
- [25] S. K. Bansal, y O. Dalrymple, "IMOD-Ont: Towards an Ontology for Instructional Module Design", *10th International Conference on Semantic Computing (ICSC)*, pp. 354-357, 2016
- [26] F. Benedetti, S. Bergamaschi y L. Po, "A Visual Summary for Linked Open Data sources", *13th International Semantic Web Conference*, vol. 1272, pp. 173-176, 2014.
- [27] V. Cosentino, J. L. Cánovas-Izquierdo y J. Cabot, "A Systematic Mapping Study of Software Development with GitHub. *IEEE Access*, vol. 5, PP. 7173-7192, 2017.
- [28] A. Dimou, L. De Vocht, G. Van Grootel, L. Van Campe, J. Latour, E. Mannens y R. de Walle, "Visualizing the Information of a Linked Open Data Enabled Research Information System", *Procedia Computer Science*, vol. 33, pp. 245-252, 2014.
- [29] R. Etemadpour, B. Olk y L. Linsen, "Eye-tracking investigation during visual analysis of projected multidimensional data with 2D scatterplots". *5th International Conference on Information Visualization Theory and Applications (IVAPP)*, pp. 233-246, 2014.
- [30] E. A. Felix, y S. P. Lee, "Integrated Approach to Software Defect Prediction", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21524-21547, 2017.
- [31] F. Ghorbel, N. Ellouze, E. Métais, F. Hamdi, F. Gargouri y N. Herradi, "MEMO GRAPH: An Ontology Visualization Tool for Everyone", *Procedia Computer Science*, vol. 96, pp. 265-274, 2016.
- [32] F. Ghorbel, F. Hamdi, N. Ellouze, E. Métais y F. Gargouri, "Visualizing Large-scale Linked Data with Memo Graph. *Procedia Computer Science*, vol. 112, 854-863, 2017.
- [33] N. Herradi, F. Hamdi, E. Métais, y A. Soukane, "Person Link: A Multilingual and Multicultural Ontology Representing Family Relationships", *International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, vol. 9382, pp. 147-154, 2015.
- [34] W. Hop, S. de Ridder, F. Frasinca y F. Hogenboom, "Using Hierarchical Edge Bundles to Visualize Complex Ontologies in GLOW", *27th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, pp. 304-311, 2012.
- [35] C. Y. Huang y T. Y. Kuo, "Queueing-Theory-Based Models for Software Reliability Analysis and Management", *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 5, pp. 540-550, 2017.
- [36] A. Hussain, K. Latif, A. T. Rextin, A. Hayat, y M. Alam, "Scalable Visualization of Semantic Nets using Power-Law Graphs", *Applied Mathematics & Information Sciences*, vol. 8, 355-367, 2014.
- [37] M. Ilyas y S. U. Khan, "Practices for software integration success factors in GSD environment", *15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, pp. 1-6, 2016.
- [38] M. Jadeja y K. Shah, "Tree-Map: A Visualization Tool for Large Data", *SIGIR Workshop on Graph Search and Beyond '15*, vol. 1393, pp. 9-13, 2015.
- [39] A. A. Khan, J. W. Keung, A. Fazal y M. Abdullah-Al-Wadud, "SPIIMM: Toward a Model for Software Process Improvement Implementation and Management in Global Software Development", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13720-13741, 2017.
- [40] H. H. Khan y M. N. Malik, "Software Standards and Software Failures: A Review with the Perspective of Varying Situational Contexts", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 17501-17513, 2017.
- [41] B. Lang, J. Wang y Y. Liu, "Achieving Flexible and Self-Contained Data Protection in Cloud Computing", *IEEE Access*, vol. 5, 1510-1523, 2017.
- [42] M. N. Malik y H. H. Khan, "Investigating Software Standards: A Lens of Sustainability for Software Crowdsourcing", *IEEE Access*, vol. 6, 5139-5150, 2018.
- [43] S. Misra, A. Adewumi, L. Fernandez-Sanz y R. Damasevicius, "A Suite of Object Oriented Cognitive Complexity Metrics", *IEEE Access*, vol. 6, 8782-8796, 2018.
- [44] L. P. Nanni y V. D. Feltrim, "DESiRe: A Dynamic Approach for Exploratory Search Results Recommendation", *4th Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS)*, pp. 288-293, 2015.
- [45] K. Ono, M. Tsunoda, A. Monden y K. Matsumoto, "Influence of outliers on analogy based software development effort estimation", *15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, pp. 1-6, 2016.
- [46] S. Popelka, Z. Stachov, C. Šašinka y J. Doležalová, "EyeTribe Tracker Data Accuracy Evaluation and Its Interconnection with Hypothesis Software for Cartographic Purposes", *Computational Intelligence and Neuroscience, 2016*, pp. 20-33, 2016.

- [47] N. A. Rakhmawati, R. P. Wibowo y M. I. H. Amir, "Visualization Application Development for Mosque Financial Report Using Linked Data and Crowd-sourcing", *Procedia Computer Science*, vol. 72, pp. 374-381, 2015.
- [48] R. H. Rosero, O. S. Gómez y G. Rodríguez, "Regression Testing of Database Applications Under an Incremental Software Development Setting", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18419-18428, 2017.
- [49] B. Shahzad, A. M. Abdullatif, N. Ikram y A. Mashkoo, "Build Software or Buy: A Study on Developing Large Scale Software", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 24262-24274, 2017.
- [50] A. Shaikh y U. K. Wiil, "Overview of Slicing and Feedback Techniques for Efficient Verification of UML/OCL Class Diagrams", *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1-20, 2018.
- [51] N. Silva, L. Shao, T. Schreck, E. Eggeling y D. Fellner, "Visual Exploration of Hierarchical Data Using Degree-of-Interest Controlled by Eye-Tracking", *9th Forum Media Technology 2016*, vol. 1734, pp. 82-89, 2016.
- [52] M. Skjæveland, "Sgvizler: A JavaScript Wrapper for Easy Visualization of SPARQL Result Sets", *The Semantic Web: ESWC 2012 Satellite Events*, vol. 7540, pp. 361-365, 2015.
- [53] K. J. Stol, B. Caglayan & B. Fitzgerald, "Competition-Based Crowdsourcing Software Development: A Multi-Method Study from a Customer Perspective", *IEEE Transactions on Software Engineering*, pp. 1-25, 2017.
- [54] M. Z. Tunio, H. Luo, W. Cong, Z. Fang, A. R. Gilal, A. Abro y S. Wenhua, "Impact of Personality on Task Selection in Crowdsourcing Software Development: A Sorting Approach", *IEEE Access*, vol. 5, 18287-18294, 2017.
- [55] T. Xin y L. Yang, "A framework of software reusing engineering management", *15th International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA)*, pp. 277-282, 2017.
- [56] A. A. Zafar, S. Saif, M. Khan, J. Iqbal, A. Akhunzada, A. Wadood, A. Alamri, "Taxonomy of Factors Causing Integration Failure during Global Software Development", *IEEE Access*, vol. 7044, 1-14, 2017.

Estrategia para conectar las necesidades de la industria con los proyectos de aula de los ingenieros de sistemas: Alianza Globant-Universidad de Medellín

Samayda Herrera¹

Liliana González P.²

Juan Guillermo F.³

Mario Luna del R.⁴

^{1, 2, 4} Universidad de Medellín

³ Globant

Colombia

Es indudable que el proceso de enseñanza-aprendizaje es una labor compleja. Al analizar la educación en áreas de ingeniería el reto es mayor porque además de impartir conocimientos teóricos es necesario acercar los estudiantes a la realidad que enfrentarán en la industria al egresar de su pregrado. En el programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Medellín se busca continuamente dinamizar la educación ingenieril, mediante el uso de enfoques como el basado en proyectos, en problemas, proyectos integradores y de aula, todos con participación de empresas reconocidas en el medio. En este capítulo se presenta una estrategia para conectar las necesidades de la industria con los proyectos de aula de los ingenieros de sistemas. Con esto se logra un aprendizaje significativo para los estudiantes, mientras que conocen de primera mano las tendencias y necesidades de las empresas, además de enfrentarse con casos reales. Se explica detalladamente el diseño de la estrategia y se presentan los resultados de un piloto donde intervienen alumnos de dos cursos de cuarto semestre. Los resultados revelan un mejor desempeño en cuanto a promedios de notas, percepción e interés de los estudiantes. Además, se identifica la posibilidad de conservar una relación gana-gana de largo plazo con las empresas, donde el alumno tiene mejores opciones para prepararse en entornos reales, y los empleadores podrán tener ingenieros que conocen la dinámica organizacional mediante sus vivencias en el pregrado.

1. INTRODUCCIÓN

La educación superior en ingeniería presenta retos interesantes. Desde el punto de vista del docente se debe trabajar para disminuir la preocupante tasa de fracaso universitario actual, reflejada en los altos índices de deserción académica [1]. Este fenómeno se produce por la falta de perspectivas de éxito, la desmotivación que genera un curso teórico sin evidencia de su utilidad a nivel profesional, la desconexión entre lo que se enseña en la universidad y la cotidianidad que enfrentan los ingenieros recién graduados, la “falta de ganas de aprender”, por mencionar solo algunos factores que influyen [2].

Es indudable que el proceso de enseñanza-aprendizaje es una labor compleja. De acuerdo con Michalko [3], involucrar dinámicamente a los estudiantes de ingeniería en las áreas de conocimiento por medio de herramientas no tradicionales de enseñanza-aprendizaje incrementa su capacidad de abstracción, facilita la profundización y desarrolla el pensamiento crítico, así como la habilidad de solucionar problemas reales. La posibilidad de recibir información inmediata sobre la precisión de las respuestas es un aspecto que anima y estimula en los procesos cognitivos [2]. El trabajo colaborativo mejora el proceso de aprendizaje y se convierte en una herramienta poderosa para facilitar un aprendizaje significativo [4]. En el programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Medellín (Colombia) se está haciendo un esfuerzo grande para dinamizar la educación ingenieril [5], [6]. Se tienen alianzas estratégicas con empresas de la industria del software. Como valor agregado ellos proponen retos reales y se vinculan activamente interactuando de forma frecuente con los estudiantes en formación. Es así como Globant (empresa multinacional reconocida en el medio) le apuesta a fortalecer la formación de los futuros profesionales por medio del acompañamiento en cursos.

En este trabajo se presenta una estrategia para conectar las necesidades de la industria con los proyectos de aula de los ingenieros de sistemas. Con esto se logra un aprendizaje significativo para los estudiantes, mientras que conocen de primera mano las tendencias y necesidades de las empresas, además de enfrentarse con casos reales. El documento se organiza como sigue: la sección 2 muestra el fundamento conceptual que sustenta la propuesta. La sección 3 contiene la problemática identificada. El diseño de la estrategia es descrito en el apartado 4. La sección 5 presenta el caso de estudio. La sección 6 detalla la validación de la estrategia. Posteriormente se lista un conjunto de lecciones aprendidas. Por último, se presentan las conclusiones, agradecimientos y referencias.

2. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se enuncian algunos conceptos que fundamentan el trabajo presentado. Se aborda la definición de aprendizaje activo y constructivismo. Luego se conecta con el significado de un proyecto de aula, como estrategia para vincular de forma protagónica al estudiante en su proceso. Posteriormente, se mencionan las metodologías ágiles en

¹ sherrera@udem.edu.co

² ligonzalez@udem.edu.co

³ juan.florez@globant.com

⁴ mluna@udem.edu.co

el desarrollo de software. Por último, se hace un breve recorrido por algunas propuestas similares reportadas en la literatura donde se evidencia una mayor interacción entre la academia y la empresa.

El constructivismo hace referencia al papel activo del estudiante en un aprendizaje significativo, la importancia de la interacción social en su formación y la solución de problemas en contextos auténticos o reales [7]. Un mecanismo poderoso para lograr la participación decidida por parte del alumno es el proyecto de aula. Se trata de una aproximación metodológica para integrar contenidos teóricos con la práctica al interior del salón de clase. Es así como se logra aplicar a través de todo el proceso de enseñanza-aprendizaje estrategias didácticas en las cuales los estudiantes adquieren competencias, conocimientos, habilidades y actitudes integradas en un saber hacer reflexivo y puesto en práctica en contextos reales. Otras ganancias que se obtienen al trabajar bajo el esquema de proyecto de aula son [8]: potenciar el trabajo autónomo, tomar decisiones bajo escenarios de estrés, entrenamiento en trabajo colaborativo, fortalecer el liderazgo, autoestima, seguridad y convivencia social, adquirir valores como aprender a convivir y respetar en entorno, entre otros.

Buscando completar el fundamento conceptual de esta investigación es necesario definir el enfoque de desarrollo de software seleccionado. No es un secreto que el agilismo es la corriente más usada en la actualidad. Surge como respuesta a las debilidades de las metodologías tradicionales, muy centradas en la planeación y en la documentación, además de ser rigurosas en fases de levantamiento de requisitos y diseño. Promueven un proceso secuencial, rígido y poca flexibilidad frente al cambio; los requerimientos son acordados de una vez y para todo el proyecto, demandando grandes plazos de planeación previa y poca comunicación con el cliente una vez ha terminado ésta.

De otro lado están las formas ágiles de desarrollo [9], que subdividen un proyecto en partes mediante una lista ordenada de características (normalmente denominada Backlog de producto). Cada parte es tratada de manera independiente y desarrolla un subconjunto de características (*sprint backlog*) durante un periodo de tiempo corto, de entre dos y cuatro semanas. La comunicación con el cliente es constante al punto de requerir un representante de él durante el desarrollo (Product owner). Los proyectos son altamente colaborativos y se adaptan mejor a los cambios; de hecho, el cambio en los requerimientos es una característica esperada y deseada, al igual que las entregas constantes al cliente y la retroalimentación por parte de él. Para orientar la propuesta objeto de este trabajo se emplearon enfoques ágiles sumados a metodologías como el pensamiento de diseño (*design thinking*), que permiten la entrega de resultados de manera frecuente [10], buscando la construcción de un producto mínimo viable con valor para el negocio, en un lapso corto de tiempo. Pasando a la revisión de otras iniciativas reportadas en la literatura sobre proyectos de aula en alianza con empresas, los hallazgos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Proyectos de investigación encontrados

Institución involucrada	Descripción de la propuesta
Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco (Cartagena-Colombia) [11]	Estrategia pedagógica para entrelazar la docencia, la investigación y la extensión a partir de los conceptos de innovación y emprendimiento. Su premisa es que la formación investigativa y el pensamiento crítico y autónomo se potencian con la investigación formativa, que a su vez se posibilita enfatizando en la solución de problemas del contexto. Los proyectos de aula se conectan con un conjunto de núcleos problemáticos definidos por el comité de los programas de ingeniería industrial y tecnología en producción industrial. Todos los productos obtenidos se presentan en una "Expoferia", espacio compartido con algunas empresas representativas del sector.
Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz- Universidad del País Vasco- España [12]	Aplicación del Aprendizaje basado en Proyectos en el curso "sistemas de gestión integrada". Para formalizar la experiencia se tiene: descripción de un escenario, los recursos didácticos necesarios, la metodología y los criterios de evaluación, resultados, sugerencias para emplear este enfoque si se tienen aulas con grupos grandes
Laboratorio para la innovación y el aprendizaje activo. Universidad Eafit [13]	En esta universidad le apuestan decididamente a un cambio en los cursos orientándolos hacia el aprendizaje activo. Para rediseñar las asignaturas se trabaja bajo el modelo ADDIE (Análisis, diseño, desarrollo, implementación, evaluación), un esquema que permite organizar el proceso de diseño de cursos bajo una estructura de cinco fases: análisis, diseño, desarrollo, implementación y evaluación, semanalmente se reúnen los participantes para trabajar con el acompañamiento y orientación
Universidad Autónoma de Baja California (UABC) [14]	Por medio de la empresa escolar de base tecnológica Avanti, creada por la UABC y dedicada al desarrollo de software, se ofrece a los alumnos la oportunidad de desarrollar proyectos de software a clientes internos y externos (a través del Servicio Social Profesional -SSP-). Los estudiantes deben tener unos conocimientos previos que se garantizan en cursos de la carrera y luego comienza la interacción bajo un enfoque de APB (Aprendizaje basado en proyectos).
Facultad de Ingenierías del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid [15]	En la institución son ofrecidos dos programas (técnico profesional en programación de sistemas y técnico profesional en soporte de sistemas de información) en los cuales se aplica la metodología de aprendizaje por competencias a partir de un proyecto integrador conectado con una organización. Para la interacción proponen: identificación de usuarios, diseño de proyecto, confirmación de equipo, ejecución de proyecto integrador, análisis y prospectiva.
Proyecto VALS, en consorcio con: Universidad de Salamanca, OpenDirective LLP, RayCom B.V, Universidad de Bolton, Universidad de Udine, Universidad de Chipre, Mindshock S.L., Universidad de Oxford - OSS Watch [16]	El proyecto Virtual Alliances for Learning Society - VALS, creado y financiado por la Unión Europea, promueve alianzas de conocimiento entre universidad y el mundo de los negocios enmarcadas en la filosofía libre (<i>Open Source, Open innovation, Open Knowledge</i>). El programa es llamado <i>Semester of Code</i> . Su objetivo principal es establecer métodos y procesos sostenibles que permitan crear y gestionar prácticas virtuales mediante la colaboración entre la academia y la industria. Los desarrollos hechos quedan disponibles para la comunidad de software libre. De esta experiencia es posible conectar posteriormente a los estudiantes para que consigan un empleo.

En un ejercicio más específico de listar las interacciones de Globant (empresa que apalanca esta propuesta) con otras universidades se tienen las propuestas de la Tabla 2.

Tabla 2. Propuestas de trabajo de Globant

Institución involucrada	Descripción de la propuesta
Universidad Eafit	En 2108 se lanzó un reto sobre "Carpooling" con una duración de 4 meses, al final de los cuales se entregó un Producto mínimo viable.
Universidad ICESI	En 2019 se trabajó en varios retos empresariales cuya duración fue de 4 meses. Algunas ideas exploradas son: carpooling, tiendas virtuales interempresariales. También se entregó un producto mínimo viable.
Universidad de Medellín	En 2018 se comenzó la exploración de retos empresariales con una duración de 8 meses. carpooling, gestión de Parquederos públicos, administración de Ciclo rutas, finding Talent fueron algunos de ellos. Se entregó igualmente producto mínimo viable.

3. PROBLEMÁTICA

Luego de tener el fundamento conceptual y un poco de revisión de experiencias por parte de otras instituciones es posible determinar que los retos a superar en una estrategia de este tipo donde lo que se busca es dinamizar el proceso de formación de los estudiantes a través de un aprendizaje activo y de cara a las necesidades reales de la industria son los siguientes:

- Armonizar los ritmos de la empresa y la academia, buscando con esto estrategias de formación que permitan desarrollar proyectos reales a partir de los conocimientos impartidos en las diferentes asignaturas, buscando identificar a partir del ejercicio brechas o debilidades que puedan ser subsanadas desde la academia, brindando a los estudiantes la oportunidad de adquirir habilidades o conocimiento que le otorguen ventajas al momento desempeñar su labor en empresas del sector.
- Garantizar vinculación real de la empresa con los procesos de formación, recibiendo de esta realimentación que permita mejorar dichos procesos y concertando espacios, actividades o proyectos en los cuales sea posible poner en práctica los conocimientos adquiridos por los estudiantes, acercando así los estudiantes a la adquisición de conocimientos acordes a las necesidades de las organizaciones.
- Lograr interacciones duraderas entre la empresa y la academia, a partir de estrategias que permitan llevar a cabo proyectos de calidad de forma sistemática, aplicando correctamente los conocimientos impartidos en las asignaturas e involucrando en el proceso a estudiantes, docentes y colaboradores de las organizaciones.

4. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA

En esta sección se explica el método seguido para incorporar retos reales en la formación de ingenieros de sistemas. Con esto se busca subsanar las dificultades expresadas en la sección anterior. El paso a paso durante la interacción y algunos aspectos logísticos de la estrategia son presentados en la Figura 1, y posteriormente se detalla cada ítem.

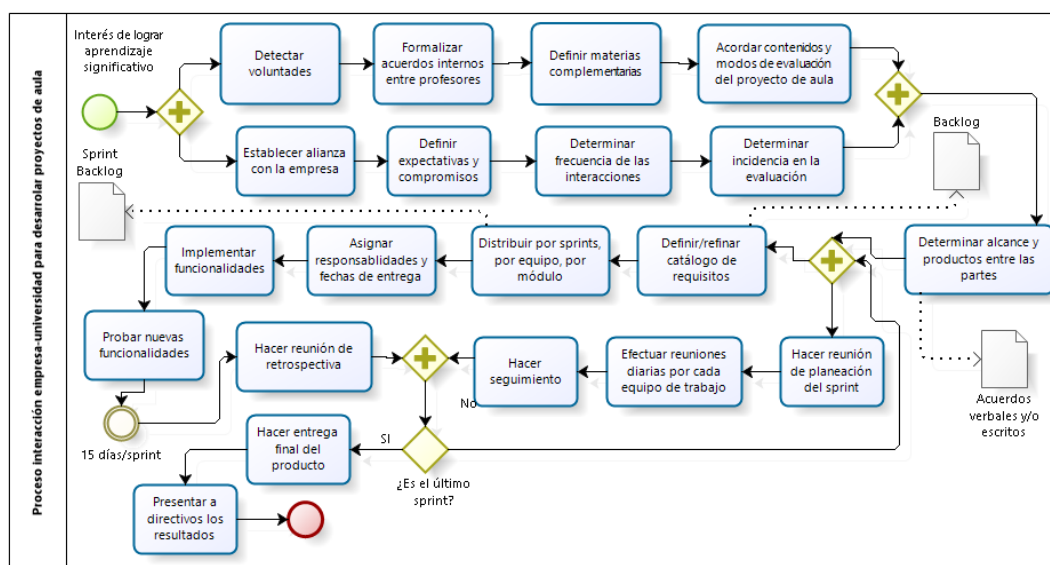


Figura 3. Diseño paso a paso de la estrategia

El proceso comenzó acordando asuntos internos y alineando voluntades de los profesores de cursos que están en el mismo semestre del plan de estudios de ingeniería de sistemas de la Universidad de Medellín. De forma paralela se pasó a establecer alianzas con empresas. En este punto se plantearon expectativas de parte y parte, posibles aportes

y valores agregados al facilitar esta experiencia a los estudiantes, además de definir de forma general el reto o la aplicación a desarrollar. En la reunión inicial entre estudiantes, profesores y personal de la empresa se detectaron los requisitos generales que debería cumplir la aplicación a construir. En esta sesión también se propuso una división lógica por módulos y una distribución de equipos asignados a cada módulo identificado. A partir de allí se comenzó a trabajar por sprint (cuya duración no superaba los 15 días).

En cada *sprint* se definían los requisitos a implementar (*sprint backlog*), los responsables, se hacían pruebas de lo desarrollado y se entregaba a la empresa, la cual hacía realimentación. De forma paralela a cada sprint se debían hacer reuniones de planeación, y otras diarias en las cuales el equipo indica sus avances, inconvenientes, y las actividades que va a desarrollar en el día. Cuando se terminan todos los *sprints* se hace entrega formal del producto mediante una presentación donde intervienen los directivos de la empresa y la universidad. Al definir las actividades puntuales que darían apoyo a la estrategia se decidió incluir las siguientes:

- Sesión de lluvia de ideas para iniciar el proyecto.
- Reuniones tipo Retrospective (lecciones aprendidas, formas de mejorar el siguiente sprint).
- Reuniones tipo *daily meeting* (indicando qué se hizo el día anterior, inconvenientes encontrados y actividades para el día actual).
- Presentación tipo Pitch con la empresa.
- Trabajo en el aula para acordar puntos críticos como: configuración de la base de datos, requisitos, división por sprint, determinación de fortalezas de cada integrante del equipo.
- Capacitaciones extra en tópicos de interés que no están en el plan de estudios, o se abordan en semestres superiores. Se trata de temas que complementan la formación de los ingenieros, y los preparan para el trabajo en una empresa.

5. CASO DE ESTUDIO Y EXPERIMENTACIÓN

El reto enunciado en la sección anterior se aplicó a un piloto inicial, muestra $n=16$ de una población total $N= 20$ estudiantes pertenecientes a dos cursos del pregrado (bases de datos y software 1) de ingeniería de sistemas de la Universidad de Medellín (Colombia). Los individuos incluidos en el experimento son de cuarto semestre y se encuentran en rangos de edades de 20 a 25 años, 31.25% fueron mujeres y 68.75% hombres. Para la selección de los estudiantes se realizó un muestreo no probabilístico por cuotas [17] utilizando los siguientes criterios: 1- estudiantes de ingeniería de sistemas, 2- estudiantes cursando las materias mencionadas anteriormente durante el primer semestre de 2019, 3- rango de edades entre 20 a 25 años. El tamaño muestral se infirió a partir de la ecuación (1).

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N-1) + Z_a^2 \times p \times q} \quad (1)$$

Donde: n = tamaño muestra, N = tamaño población, Z = nivel de confianza (igual 1.96 para una confianza de 95%), p y q = probabilidades de éxito y fracaso (ambas evaluadas en 50%), d = precisión (equivalente al 3%). Los valores de Z_a , p , q y d son escogidos de acuerdo a configuraciones estándar recomendadas en la literatura [17]. El experimento duró todo el primer semestre de 2019. Software 1 es una materia de 4 créditos con una duración de 64 horas, mientras que el curso de bases de datos es de 6 créditos con un total de 96 horas.

El reto propuesto fue construir una aplicación móvil para reportar una emergencia médica, enviando mensajes o haciendo llamadas a una lista de contactos previamente configurados por el mismo usuario. En el mensaje se entrega una breve descripción de la emergencia, el nombre de la persona involucrada, su ubicación y una recomendación del hospital o centro de salud más cercano para llevar al paciente y que reciba atención. La construcción de esta aplicación (cuyo nombre es Ayudapp, elegido democráticamente entre los involucrados) implicó adquisición de nuevos conocimientos (por ejemplo, programación web, control de versiones, experiencia de usuario). Además del aspecto técnico se necesitó mayor compromiso, buena comunicación y trabajo en equipo. Todo lo anterior puede considerarse riesgos potenciales del proyecto, y para mitigarlos se realizaron diferentes capacitaciones a los estudiantes en los siguientes temas:

- *Control de versiones con Git*: esta capacitación permitió brindar a los estudiantes conocimientos básicos sobre el control de versiones, con el fin promover el trabajo en equipo y apoyar la integración de los aportes en desarrollo realizados por los estudiantes.
- *Servicios web*: esta capacitación brindó a los estudiantes bases para crear servicios web los cuales fueron consumidos posteriormente por la APP desarrollada en la plataforma Android. El trabajo bajo esta metodología

permitió a los estudiantes que aún no han visto la asignatura de base de datos, participar activamente en el proyecto y a los estudiantes que cursan la asignatura, interactuar de forma activa con la base de datos del proyecto.

La comunicación entre el equipo de trabajo fue vital. Se estableció WhatsApp como canal para dar a conocer las dudas, decisiones e inconvenientes presentados durante el desarrollo de la aplicación. La interacción se reforzó también en las asignaturas de Software 1 y Bases de Datos, mediante reuniones en el aula. Luego de establecer los acuerdos iniciales entre los docentes de los cursos se definió el siguiente esquema de evaluación presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Esquema de evaluación

Descripción entregable	Porcentaje evaluado	Asignatura
Entregable 1: Documento maestro que contenga: backlog de producto, user story mapping, sprint backlog, código fuente, video demo de la aplicación, presentación tipo Pitch ante personal de Globant. También se tiene un porcentaje de coevaluación y autoevaluación.	8.333% (Seguimiento)	Software 1
Entregable 2: asociado al segundo sprint del desarrollo, refinando los artefactos de documentación como backlog, user story mapping, y agregando nuevas funcionalidades	8.333% (Seguimiento)	Software 1
Entregable 3: Presentación con directivos de Globant y de UdeM. Además, se debe entregar un refinamiento de la aplicación para que cumpla las características de producto mínimo viable.	12.5% (examen final)	Software 1
Entregable 1: Diagrama relacional, construcción de base de datos y de servicios para CRUD de usuarios, contacto, EPS, servicios web para módulo de Login. Documentación de servicios.	10% (Seguimiento)	Bases de datos
Entregable 2: Modificación de servicios actuales, creación de servicios de consulta de información según las necesidades de la aplicación. Documentación de servicios, utilización de servicios desde APP en Android con librería Volley.	10% (Seguimiento)	Bases de datos
Entregable 3: Presentación con directivos de Globant y de la Universidad	10% (examen final)	Bases de datos

Se estableció también que los involucrados desde la empresa deberían asistir a todas las presentaciones de avance de los estudiantes (Figura 2). Estas reuniones se harían una vez en la universidad y una vez en la empresa, esto para generar mayor nivel de compromiso. El desarrollo puntual de la aplicación Ayudapp inició con el análisis de requisitos de la herramienta, este proceso se realizó en conjunto con la empresa Globant (mediante una sesión de lluvia de ideas), estudiantes y docentes, dando a los estudiantes la posibilidad de proponer funcionalidades adicionales que pudieran ser de utilidad para el público objetivo de la herramienta.



Figura 4. Evidencias sesión inicial del proyecto

Luego del análisis inicial de requisitos se procedió desde la asignatura de Software 1 a documentar los requerimientos, haciendo uso del User Story Mapping, y enfocando el proyecto a metodologías ágiles como Scrum con el propósito de poner en práctica los conceptos aprendidos en la asignatura Software 1. User Story Mapping, es una forma de llegar al backlog de una manera visual orientada a obtener las historias de usuario en función de los flujos principales de una aplicación. Esta herramienta gráfica cuenta con dos dimensiones:

- La dimensión horizontal representa la secuencia de las historias de usuario.
- La dimensión vertical que representa las prioridades de las historias.

Esta forma de representación proporciona una panorámica general de todo el desarrollo además de lograr una estimación inicial por sprint. A su vez el user story map cuenta con los siguientes elementos:

- El backbone de la aplicación/producto es la lista de actividades-grandes historias o metas- esenciales que la aplicación/producto soporta.
- El walking skeleton es el producto mínimo viable (MVP), es decir el que contiene el mínimo número de tareas necesarias a través del ciclo completo de la experiencia del usuario.

El user story map construido para el proyecto Ayudapp (en la herramienta RealTimeboard) se indica en la Figura 3. Posterior al user story map se pasó a hacer un primer acercamiento a la documentación de historias de usuario y creación del *Product Backlog* por medio de la herramienta Trello (Figura 4). Esta información es presentada nuevamente a la empresa con el fin de limitar el alcance de la aplicación a construir. La siguiente es una parte del backlog, donde se muestran tareas ya ejecutadas.



Figura 5. User story mapping de la aplicación Ayudapp

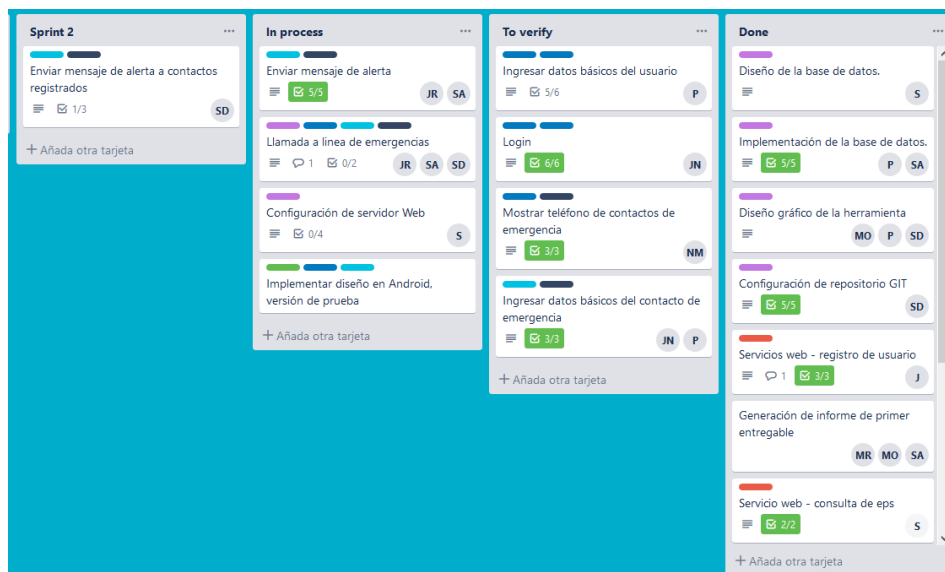


Figura 6. Segmento del backlog de la aplicación Ayudapp

Para la asignación de responsabilidades del equipo, fue necesario identificar el perfil de cada uno de los estudiantes, sus fortalezas y debilidades en el desarrollo de software y el conocimiento en áreas como bases de datos, ingeniería de software y desarrollo sobre plataformas Android, con el fin de conformar equipos que pudieran complementarse al momento de llevar a cabo las actividades, y un equipo integrador encargado de gestionar el proyecto. A partir de la identificación de los perfiles, de la conformación de los equipos de trabajo y del análisis de requerimientos de la plataforma, continuó la ejecución del mismo con la asignación de tareas, siendo los estudiantes que conforman el equipo integrador, los encargados de documentar (historias de usuario), asignar actividades, hacer el control de las actividades asignadas, administrar los repositorios, apoyar la integración de los aportes de los demás estudiantes y validar la entrega de los mismos, realizando pruebas funcionales a la herramienta.

La ejecución del proyecto se dividió en 3 Sprint. Durante el primer sprint se enfatizó la configuración del proyecto, capacitando a los estudiantes en el uso de herramientas como Git, la creación de servicios Web. Se obtuvo el servidor Web sobre el cual están disponibles los servicios y se realiza la revisión de las historias de usuario y asignación de tareas al equipo de trabajo, se crea también la base de datos con el fin de iniciar el trabajo con los servicios web, y se realiza el diseño gráfico de las interfaces de la herramienta. Los productos mencionados se presentan a Globant para recibir la respectiva realimentación. A continuación, en la Figura 5 se presenta la base de datos del proyecto.

Se trabajó con una base de datos relacional, sobre el motor de base de datos MySQL. Para facilitar el acceso a los datos se emplearon servicios Web que puedan ser consumidos desde la aplicación desarrollada en Android. Esta configuración permite a futuro realizar modificaciones sobre la base de datos, cambiar el motor de base de datos si se requiere o realizar modificaciones sobre los servicios web, afectando de forma mínima el desarrollo. La orientación hacia servicios facilita a los participantes que aún no tienen conocimiento de Bases de Datos, aportar en el desarrollo de la herramienta, pero tiene como inconveniente el desconocimiento del lenguaje de programación sobre el cual se crearon los Servicios Web (PHP) y la configuración de los mismos, lo cual es subsanado por medio de capacitaciones básicas en PHP y Servicios Web.

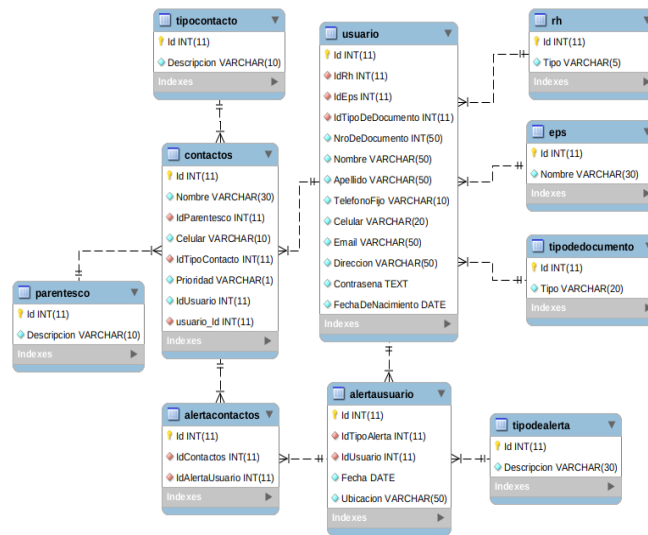


Figura 7. Base de datos de la aplicación Ayudapp

De acuerdo a la realimentación proporcionada por la empresa Globant, se estableció como entregable del Sprint 2, ajustes sobre la interfaz gráfica, registro de usuario, creación de *login* y la generación de una alerta básica. En este segundo Sprint surgen problemas de integración de la herramienta, comunicación y compromiso del equipo de trabajo, lo cual impide cumplir a cabalidad las obligaciones adquiridas. Al presentar nuevamente avances del proyecto a la empresa, se establecieron nuevos compromisos de entrega, se limitó nuevamente el alcance el proyecto, se obtuvo apoyo por parte de la empresa en la reestructuración de las historias de usuario; se tomó también la decisión de apartar del grupo algunos integrantes que no hicieron aportes significativos al proyecto. En la Figura 6 se presentan algunas interfaces de Ayudapp.

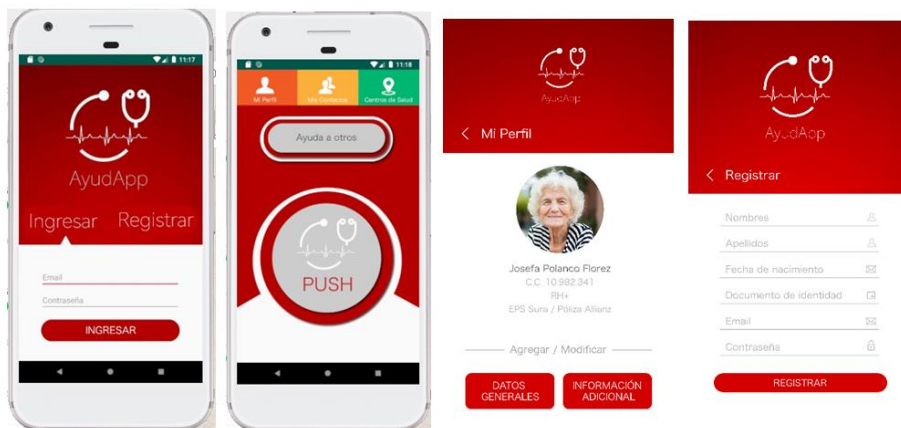


Figura 8. Interfaces de la aplicación Ayudapp

El Sprint 3 estuvo enfocado al desarrollo de las funcionalidades faltantes relacionadas con el registro de usuarios y login, se aplicaron las correcciones de la interfaz gráfica, se crearon contactos asociados a los usuarios y se generó una alerta básica. Finalizado el Sprint 3, se realizó la reunión de retrospectiva en la cual se abordaron temas como aspectos que funcionaron bien en el desarrollo del proyecto, aspectos por mejorar, aprendizajes obtenidos, sugerencias para trabajos futuros. Esta reunión fue apoyada por una encuesta de percepción aplicada a los estudiantes que hicieron parte del proyecto.

6. VALIDACIÓN

Esta etapa se orientó mediante un comparativo con cursos de la misma institución de semestres anteriores. En dichos grupos no había interacción con empresas de la industria de software y se trabajaban retos internos o hipotéticos. Se midieron indicadores como: notas de seguimiento y percepción de los estudiantes. La muestra estuvo configurada como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Muestra de estudiantes

Muestra aplicando interacción con la empresa	Muestra sin interacción con la empresa
Grupo 1 2019-01: 15 estudiantes	Grupo 1 2018-01: 11 estudiantes
Grupo 2 2019-01: 8 estudiantes	Grupo 2 2018-02: 11 estudiantes

Es importante recordar que algunos estudiantes de software 1 (Tabla 4) también estaban matriculados en bases de datos (por eso la muestra es de 16 individuos). El análisis se hace desde dos puntos de vista: 1) desempeño de los estudiantes en términos de la nota obtenida en la actividad asociada al proyecto de aula, y 2) percepción global de los estudiantes sobre la interacción con retos de empresa para su proyecto de aula. Frente a la valoración del desempeño de los estudiantes se realizó una comparación de las notas (Tabla 5) definitivas de la misma actividad evaluativa (en términos de contenido) con dos estrategias distintas (proyecto hipotético vs proyecto real vinculado a empresa). En ambas actividades se pretendió mantener la coherencia entre el objetivo de evaluación.

Tabla 7. Calificaciones grupo 1

Grupo ingeniería de software 1	Proyecto hipotético 2017-02		Proyecto real con empresa 2019-01	
	Entregable 1	Entregable 2	Entregable 1	Entregable 2
2019-01	3.5	4	3.9	4.3

Tabla 8. Calificaciones grupo 2

Grupo bases de datos	Proyecto hipotético 2017-02		Proyecto real con empresa 2019-01	
	Entregable 1	Entregable 2	Entregable 1	Entregable 2
	3.8	4.5	4,7	5

Las preguntas que contestaron los estudiantes para recopilar su percepción se presentan en la Figura 7 y el género y semestre de los participantes en las Figura 8.

¿Qué competencias se fortalecieron mediante este proyecto donde hay interacción con empresa? *

- Capacidad de interpretación y síntesis
- Trabajo en equipo
- Análisis
- Capacidad para comunicar ideas
- Creatividad
- Capacidad de abstracción
- Liderazgo
- Capacidad de negociación y priorización

¿Qué conocimientos adquiriste a partir de esta experiencia? *

- Implementación de metodologías ágiles
- Bases de datos
- Gestión de proyectos
- Lenguajes de programación
- Gestión de la configuración y versionamiento
- Otro: _____

Prefieres un proyecto de aula: *

- Sobre un proyecto real propuesto por una empresa
- Sobre un proyecto hipotético
- Sobre un proyecto de investigación
- Sobre un proyecto que libremente elijan los estudiantes

Consideras que la comunicación entre el equipo a través de los medios establecidos fue: *

- Excelente
- Muy buena
- buena
- regular
- mala

Califica el compromiso de tu equipo con el proyecto: *

1 2 3 4 5

¿Qué aprendiste durante esta experiencia? enuncia aspectos positivos y negativos *

Figura 9. Formulario de evaluación de la estrategia

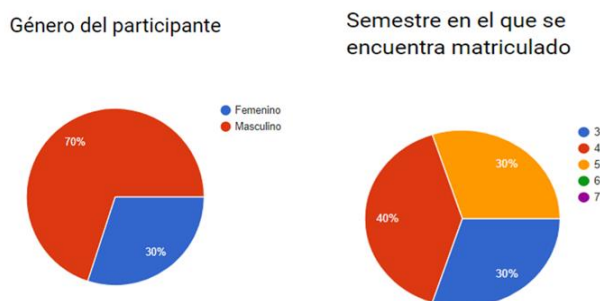


Figura 10. Género y semestre de los participantes

En cuanto al sexo de los participantes, la mayoría son hombres, y esto es el reflejo de lo que día a día se ve en las aulas de programas de ingeniería de sistemas. De otro lado, los estudiantes participantes son de tercero, cuarto y quinto semestre de la carrera. En la Figura 9 se aprecian las competencias bandadas evaluadas. Como se observa en la Figura 10, los estudiantes reconocen que mediante un ejercicio de este tipo logran aumentar la capacidad de interpretación, el trabajo en equipo, el análisis, la capacidad para comunicar ideas, entre otros. Todas las anteriores son competencias mal llamadas blandas, y a las cuales no se les presta la suficiente atención.

¿Qué competencias se fortalecieron mediante este proyecto donde hay interacción con empresa?

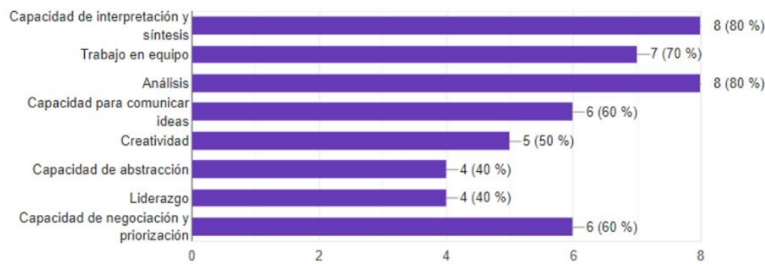


Figura 11. Competencias blandas evaluadas

¿Qué conocimientos adquiriste a partir de esta experiencia?

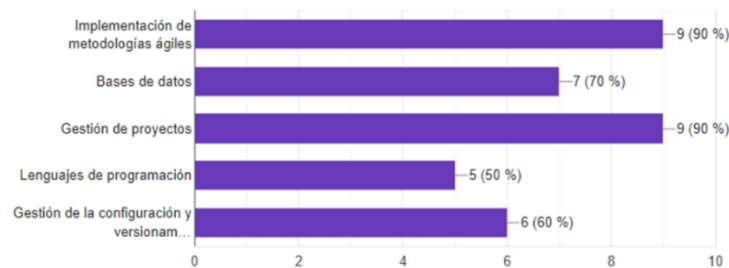
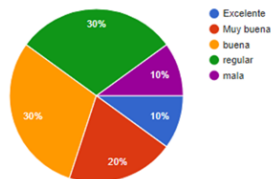


Figura 12. Competencias técnicas evaluadas

En cuanto a conocimientos técnicos, mediante estrategias de este tipo es posible integrar múltiples contenidos y verificar su asimilación de una forma más fácil y contundente (Figura 11).

Consideras que la comunicación entre el equipo a través de los medios establecidos fue:



Califica el compromiso de tu equipo con el proyecto:

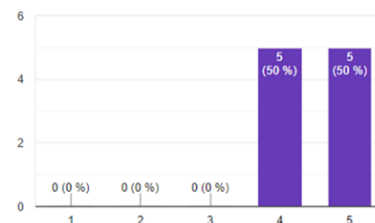


Figura 13. Aspectos de comunicación evaluados

En la parte de comunicación entre los equipos si se evidencian algunos aspectos por mejorar, que serán comentados en la sección de lecciones aprendidas. Lo anterior está muy conectado a la percepción que tienen los estudiantes sobre el compromiso de sus otros compañeros frente al trabajo propuesto. Además de la validación hecha a partir del piloto y de las percepciones de los estudiantes, también se pidió a personal de Globant un breve resumen de su opinión frente a este tipo de iniciativas, a lo cual respondieron: Las experiencias obtenidas con proyectos de aula son muy enriquecedoras ya que los estudiantes desde su punto de vista no viciada, demuestran gran imaginación sobre la solución de los retos o aplicaciones propuestas. Desde la industria, se deben apoyar estas iniciativas para que su desarrollo sea más cercano a la realidad y no trabajar bajo escenarios de supuestos.

7. LECCIONES APRENDIDAS

Sin lugar a dudas durante la ejecución del experimento se detectaron muchos aspectos por mejorar, y otros que deben ser reforzados que puedan mejorar la probabilidad de éxito del proyecto. Se evidencia la importancia de involucrar la empresa no solo para reuniones iniciales sino para hitos intermedios, con el fin de obtener de esta aprobación y realimentación de forma temprana y evitar así reprocesos.

Para los estudiantes fue valiosa la experiencia de interactuar con la empresa, hacer la interacción cambiando de lugar (unas veces en la empresa, otras en la universidad). Genera en ellos un mayor nivel de compromiso de las partes, y los acerca mucho más al entorno de un proyecto real.

Durante el desarrollo del proyecto se pudo evidenciar la dificultad de trabajar con equipos grandes, ya que el control del mismo fue más difícil y se generaron problemas de comunicación. Por tal motivo se recomienda trabajar con equipos pequeños de estudiantes, ya que trabajar con todo el grupo, pero distribuyendo por módulos genera dificultades en la gestión del proyecto y disminuye el compromiso de los integrantes, recargando actividades sobre unos pocos, al tomar esta decisión se debe tomar en cuenta también el tamaño del proyecto. También se recomienda en este caso si se está trabajando con equipos grandes tener un equipo de integración que tenga conocimientos técnicos y que más allá de la gestión pueda apoyar y solucionar inconvenientes en el desarrollo e implementación.

Debido a que los estudiantes poseían conocimientos básicos sobre muchos aspectos, y que el contenido de las asignaturas en las cuales se está trabajando el proyecto es evaluador al desarrollar el mismo, es necesario ajustar el orden de los contenidos de los cursos acorde a las necesidades del proyecto puntual que se esté desarrollando en alianza con la empresa.

Los estudiantes tuvieron falencias en la utilización algunas herramientas, por lo tanto, se recomienda validar su conocimiento sobre las herramientas que será utilizadas antes de comenzar el proyecto, y en caso de requerirse ofrecer capacitaciones extra a los estudiantes para que adquieran conocimientos que no se contemplan en los cursos de pregrado, pero que son necesarios incluso para el ejercicio profesional. Por ejemplo: Git hub, herramientas para gestión de proyectos, presentaciones tipo pitch.

Durante el desarrollo del proyecto se pudo evidenciar falta de compromiso por algunos integrantes, por tal motivo es necesario definir mecanismos más rigurosos para hacer seguimiento al trabajo de cada integrante del equipo, esto para evitar que estudiantes poco comprometidos obtengan buenos resultados. Al ser Ayudapp una herramienta realizada para una compañía, era necesario y recomendable contar con apoyo desde la parte de diseño gráfico para obtener mejores resultados desde el punto de vista estético.

La gestión de un proyecto requiere conocimiento y experiencia en el área, por lo tanto, fue necesario brindar apoyo al equipo integrador para mejorar la planeación, gestión del proyecto e implementación de metodologías de desarrollo. Durante el desarrollo del proyecto, los estudiantes se vieron más interesados en llevar a cabo el desarrollo, fue necesario hacer énfasis por parte de los docentes en el *testing* con el fin de garantizar el buen funcionamiento de la herramienta.

La calidad de software es un factor que debe ser tenido en cuenta al desarrollar los proyectos, por esto es necesario realizar auditoria en la implementación del proyecto, y brindar a los estudiantes recomendaciones sobre buenas prácticas de desarrollo para mejorar la calidad de los entregables.

El proyecto brindo a los estudiantes conocimientos adicionales a los presentados en las asignaturas, por tal motivo es necesario mejorar la planeación de la evaluación del proyecto en las asignaturas para tener en cuenta aspectos relacionados a conocimientos adicionales que se puedan adquirir los estudiantes en el desarrollo del mismo. Algunos inconvenientes presentados se dieron debido a la falta de comunicación, no solo entre los estudiantes, sino también entre el estudiante y la organización, en este caso particular, la organización brindo el apoyo técnico en el desarrollo de la APP, el cual pudo haber sido mejor aprovechado, se recomienda entonces motivar la comunicación entre el estudiante y la empresa con el fin de aprovechar al máximo el apoyo que esta pueda brindar en la resolución de dudas relacionadas al desarrollo del producto o gestión del proyecto.

8. CONCLUSIONES

En este capítulo se diseñó una estrategia para conectar las necesidades de la industria con los proyectos de aula de los ingenieros de sistemas. Se logró evidenciar que los proyectos de aula donde se vinculan varios cursos de la carrera y además generan alianzas directas con la empresa son una poderosa estrategia pedagógica para alcanzar las competencias de cada asignatura. Este proceso, es un aprendizaje recíproco, en donde hay retroalimentación entre el docente y el estudiante, aspecto evidente en las diferentes etapas del proceso de proyecto de aula, como son la conformación de grupos de trabajo, las tutorías del colectivo docente, las sustentaciones y la experiencia de participar en un evento de cierre con participación de la industria. Con todo esto se logran además los propósitos institucionales de formación integral con las competencias de Innovación y otras denominadas blandas (trabajo en equipo, capacidad de mediar conflictos, gestión, capacidad de hablar en público).

Esto trae como consecuencia un cambio en los procesos de enseñanza-aprendizaje, así como la participación en nuevas experiencias por parte de los involucrados. Se espera que el alumno no solo aprenda de manera tradicional, sino que se involucre en procesos de inducción, deducción, conjetura, experimentación, planteamiento de problemas,

construcción de alternativas de solución, así como evaluación de su propio proceso de apropiación de los aprendizajes.

Así mismo, otro de los actores fundamentales en todo proceso educativo, el profesor, se vuelve un participante activo en el proceso de construcción del conocimiento, tiene como centro de atención al estudiante, se ocupa de acompañarle a construir sus propios conocimientos, interactúa sobre los contenidos propuestos. Todo esto con la finalidad de obtener una serie de aprendizajes que pretenden fortalecer el motivo principal de esta experiencia educativa, es decir la solución de un problema a través de un proyecto en forma colaborativa con sus alumnos y demás compañeros responsables del grupo.

Con el objetivo de darle continuidad a este tipo de iniciativas se propone seguir aplicando la estrategia descritas en diferentes cursos y refinar en la medida que se puedan replicar varios experimentos. Esto dará pie a un análisis profundo que permita contrastar resultados y llegar a conclusiones definitivas sobre la efectividad del aprendizaje activo. También se sugiere usar los materiales generados por los mismos estudiantes, para que las nuevas generaciones aprendan de sus otros compañeros.

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Medellín (Decano Carlos Eduardo López Bermeo) por facilitar espacios de experimentación y mejora de la labor docente y creer en propuestas innovadoras para generar un aprendizaje significativo en los estudiantes. A Colciencias, ente financiador de la investigación en Colombia. A Globant por el compromiso mostrado durante toda la experiencia.

REFERENCIAS

- [1] L. A. Melo, J. E. Ramos, and P. O. Hernández, "La educación superior en Colombia: situación actual y análisis de eficiencia," *Revista Desarrollo y sociedad*, p. 59-111, 2017.
- [2] D. Acevedo, J. D. Torres, and D. F. Tirado, "Análisis de los Hábitos de Estudio y Motivación para el Aprendizaje a Distancia en Alumnos de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Cartagena (Colombia)," *Formación universitaria*, vol. 8, p. 59-66, 2015.
- [3] M. Michalko, *Thinkertoys: A handbook of creative-thinking techniques*: Ten Speed Press, 2010.
- [4] J. E. P. Castrillón, M. J. A. Camacho, and C. A. C. Castro, "Aprendizaje basado en problemas en el camino a la innovación en ingeniería," *Revista Ingenierías USBMed*, vol. 7, p. 96-103, 2016.
- [5] M. C. Gómez, J. A. Echeverri, and L. González, "Estrategia de evaluación basada en juegos: Caso Ingeniería de Sistemas Universidad de Medellín," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 25, p. 633-642, 2017.
- [6] L. G. Palacio, M. G. Palacio, and H. J. O. Pabón, "Meaningful experiences in virtual courses of programming fundamentals for engineers," in *2017 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 2017, p. 1-6.
- [7] M. Staron, "Using Experiments in Software Engineering as an Auxiliary Tool for Teaching--A Qualitative Evaluation from the Perspective of Students' Learning Process," in *29th International Conference on Software Engineering (ICSE'07)*, 2007, p. 673-676.
- [8] E. Rodríguez, É. M. Vargas, and J. Luna, "Evaluación de la estrategia" aprendizaje basado en proyectos", *Educación y educadores*, vol. 13, p. 13-25, 2010.
- [9] A. N. Cadavid, J. D. F. Martínez, and J. M. Vélez, "Revisión de metodologías ágiles para el desarrollo de software," *Prospectiva*, vol. 11, pp. 30-39, 2013.
- [10] M. Razavian, A. Tang, R. Capilla, and P. Lago, "In two minds: how reflections influence software design thinking," *Journal of Software: Evolution and Process*, vol. 28, p. 394-426, 2016.
- [11] I. Marrugo, C. Guzmán, H. Garzón, O. Haydar, and E. Bedoya, "Proyecto de Aula, Herramienta Articuladora para la Formación en Competencias de Investigación, Innovación y Emprendimiento," 2017.
- [12] A. Rodríguez, R. Ríos, and J. M. Larrañaga, "Aprendizaje Basada en Proyecto (PBL), descripción de una experiencia desarrollada en aula universitaria y sugerencias para optimizar resultados," 2017.
- [13] B. Morales, R. Edel, and G. Aguirre, "Modelo ADDIE (análisis, diseño, desarrollo, implementación y evaluación): Su aplicación en ambientes educativos," *Los modelos tecno-educativos, revolucionando el aprendizaje del siglo XXI*, p. 33-46, 2014.
- [14] M. A. A. Vargas, B. L. F. Ríos, J. E. I. Esquer, J. M. Camacho, and L. E. V. Corral, "Impacto del aprendizaje basado en proyectos implementado en una empresa escolar de Base Tecnológica dedicada al desarrollo de Software," *ReCIBE*, vol. 4, 2016.
- [15] J. E. G. Plaza, M. A. R. Nuñez, C. A. R. Noguera, and L. N. Z. Puerta, "Formación en competencias específicas para la industria del software colombiano. Experiencias del uso del aprendizaje basado en proyectos," *Revista colombiana de tecnologías de avanzada (RCTA)*, vol. 1, 2017.
- [16] F. J. García and J. Cruz, "Proyecto Europeo VALS y Semester of Code: Prácticas Virtuales en Empresas y Fundaciones relacionadas con el Software Libre a nivel europeo," 2016.
- [17] J. Scharager and P. Reyes, "Muestreo no probabilístico," *Metodología de la investigación para las ciencias sociales*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001.

Una aplicación móvil de Realidad Aumentada para la enseñanza de la gestión de almacenes en logística

Juan D. Bernal P.¹

Jorge Bacca²

Julio M. Daza E.³

Fundación Universitaria Konrad Lorenz – Colombia

La aplicación de la Realidad Aumentada Móvil en el ámbito educativo ha cambiado considerablemente el patrón de educación tradicional. Se ha demostrado que el uso de esta tecnología en las clases puede aumentar la efectividad y el atractivo de las actividades de enseñanza y aprendizaje. Sin embargo, la investigación en el uso de Realidad Aumentada para la enseñanza de temas en el área de logística aún es escaso. El objetivo de esta investigación es desarrollar una aplicación móvil de realidad aumentada, para mejorar la percepción del estudiante en la temática de configuración de almacenes y centros de distribución en cursos de logística. La aplicación fue desarrollada utilizando tres niveles de conocimiento (entender, analizar, aplicar). En este capítulo, se toma como ejemplo un estudio de caso sobre el aprendizaje de las técnicas heurísticas de enrutamiento de pedidos en un almacén. El grupo de estudio de la investigación estuvo compuesto por 40 estudiantes de último año de Ingeniería Industrial, en 3 universidades privadas para el semestre 2019-1, quienes evaluaron y comentaron la aplicación desarrollada. La evaluación de la aplicación muestra resultados positivos en términos de aceptación y usabilidad. Los comentarios revelan que la aplicación desarrollada genera una experiencia de aprendizaje de alta calidad y una atmósfera activa en el aula; incluso creando una discusión grupal que ayuda a resolver los ejercicios dados. Lo anterior, nos permite concluir que usar la aplicación móvil de realidad aumentada desarrollada es: agradable, fácilmente aplicable y muy útil para enseñanza de la gestión de almacenes en cursos de logística.

1. INTRODUCCIÓN

Según Majid, Mohammed and Sulaiman [1] la Realidad Aumentada (RA) nació después de la Realidad Virtual (RV). La RA es una tecnología que permite superponer información virtual sobre objetos del mundo real [2], con una interfaz donde interactúan las escenas compuestas y las personas. A diferencia de la RV que proporciona a los usuarios escenas donde la ambientación es totalmente virtual, la Realidad Aumentada brinda a los usuarios una escena en la que coexisten objetos del mundo real y virtual; actuando como un puente entre estos dos mundos.

Como mencionó Panetta [3], la Realidad Aumentada fue una de las tecnologías emergentes más relevantes y desarrolladas en 2018. Sin embargo, con el rápido desarrollo de dispositivos móviles y teléfonos inteligentes, el aprendizaje móvil y la realidad aumentada, dan origen a una nueva tecnología llamada Realidad Aumentada Móvil (RAM). Esta tiene cuatro componentes principales: 1) la cámara que se utiliza para capturar la información del objetivo, 2) el marcador que consiste en la información del objetivo, 3) un dispositivo móvil que procesará y almacenará la información del objetivo siempre que se lee y 4) el contenido digital que mostrará la cámara cuando lea el marcador de destino [1].

En los últimos años, la mejora de los dispositivos móviles asegura que los contenidos basados en la tecnología RAM, permitirán tener una comunicación más efectiva en comparación con los basados en aplicaciones web y de escritorio. Esto genera enormes potenciales de aplicación en diversos campos industriales y de servicios, incluido la educación; donde el uso de esta tecnología en las clases ha cambiado considerablemente el patrón educativo tradicional, logrando aumentar la efectividad y el atractivo de las actividades de enseñanza y aprendizaje. El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo y evaluación de una aplicación basada en RAM, para mejorar la percepción del estudiante en la temática de configuración almacenes y centros de distribución en cursos de logística.

De acuerdo con Waters [4], la logística es la capacidad básica que permite a la empresa obtener y mantener una ventaja competitiva. Esta se centra en tres estrategias que buscan la satisfacción del cliente: 1) localización de las instalaciones, 2) transporte y distribución y 3) gestión de almacenes. Siendo la gestión de almacenes la que representa mayores costos operativos y de capital. Según Mourtzis et al. [5], los costos operativos y de capital del almacenamiento, en Europa, representan aproximadamente el 25% de los costos logísticos, mientras que las cifras para los EE. UU. Muestran que el almacenamiento contribuye aproximadamente al 10% [6]. A pesar de la importancia del almacén en la logística de las cadenas de suministro, el uso de tecnologías RAM para la enseñanza de esta estrategia logística aún es escaso. En la gestión de almacenes existe un proceso crítico llamado preparación de pedidos (u order picking, en inglés), que consume hasta el 60% de todas sus actividades. En este, los productos se recogen de ubicaciones de almacenamiento específicas en función de los pedidos del cliente. En entornos de reales, los pedidos tienden, cada vez más, a llegar tarde y deben enviarse el mismo día en horarios de salida fijados por el área de destino. Esto ocasiona una presión continua para llevar a cabo el proceso de preparación de pedidos de la manera más eficiente posible.

¹ juand.bernalp@konradlorenz.edu.co

² jorge.bacca@konradlorenz.edu.co

³ juliom.dazae@konradlorenz.edu.co

Con respecto a lo anterior, una forma de lograr ahorros es mediante la optimización de las rutas de preparación de pedidos, dado que el preparador de pedidos tiene que recoger una cantidad de productos en cantidades específicas, en diversas ubicaciones del almacén. Lo anterior hace parte de la temática llamada configuración de almacenes y centros de distribución. Aquí, se estudian varios algoritmos heurísticos de enrutamiento, para encontrar rutas de recolección de pedidos más cortas. Estos métodos de ruteo en almacenes son desarrollados, por los estudiantes, en la aplicación basada en RAM diseñada en esta investigación. En este contexto, las contribuciones de este capítulo son las siguientes:

- En esta investigación desarrollamos una aplicación móvil de realidad aumentada llamada LogistiK, para apoyar el aprendizaje de los estudiantes en la temática de configuración de almacenes y centros de distribución en cursos de logística.
- En este trabajo diseñamos una nueva actividad de aprendizaje sobre las técnicas heurísticas de enrutamiento de pedidos en un almacén, que se basa en un enfoque de aprendizaje experiencial.
- Este trabajo presenta un estudio riguroso de usabilidad y aceptación de la aplicación LogistiK, para la enseñanza de la gestión de almacenes en los cursos de logística.

Finalmente, el resto del capítulo se estructura de la siguiente forma. La sección 2, presenta el marco teórico y los trabajos relacionados respecto a la RA y sus aplicaciones en logística. En la sección 3 se detalla la aplicación basada en RAM desarrollada en esta investigación. La sección 4 esboza la metodología de investigación adoptada, así como el instrumento y procedimiento de investigación utilizado. Por último, las secciones 5 y 6 presentan la discusión, el análisis de resultados fruto de la aplicación del instrumento diseñado y las conclusiones finales que sirven de guía para trabajos futuros.

2. MARCO TEÓRICO Y TRABAJOS RELACIONADOS

2.1 Realidad Aumentada

La realidad aumentada es una tecnología que complementa la información del mundo real con datos y contenidos digitales, de tal forma que pareciera que la información co-existe en el mundo real [7]. Un ejemplo para entender cómo funciona la realidad aumentada podría ser el siguiente: una persona utiliza su dispositivo móvil (tablet o smartphone) para apuntar con la cámara a una pintura en un museo. En la pantalla del celular aparece la pintura, pero sobre la pintura aparece información adicional como, por ejemplo; el nombre del pintor, el año, el lugar en que fue pintada y una explicación sobre la idea que transmite la pintura. Además, el visitante del museo podría ver un video directamente en su dispositivo móvil con una explicación avanzada sobre los detalles de la pintura. Esta información adicional, incluyendo el video, pareciera que está superpuesta sobre la pintura. Este tipo de realidad aumentada se conoce como realidad aumentada basada en marcadores, porque la pintura es el elemento que la cámara del dispositivo móvil reconoce para poder superponer la información. En este caso, la pintura viene a ser el marcador.

2.2 Realidad aumentada en logística

La realidad aumentada se ha utilizado para el desarrollo de aplicaciones en diversos campos como la medicina, la educación, el marketing, el entretenimiento, el área militar, el turismo y la industria (simulación, diseño, ensamblaje de productos, etc.) [8]. En el área industrial, la realidad aumentada está comenzando a ser utilizada en diversas aplicaciones; entre ellas en el campo de la logística. Sin embargo, de acuerdo con Stoltz y otros [9], a pesar de los avances en realidad aumentada, en el campo de la industria y concretamente en la logística, la realidad aumentada aún no ha logrado una madurez suficiente; como sí se la ha logrado en otros campos como los videojuegos o el entretenimiento. A continuación, se reportan algunos trabajos relacionados con el uso de la realidad aumentada en el área de la logística. Wenzel y Jensen [10] proponen la integración de las tecnologías de realidad aumentada y realidad virtual, para el modelado en 3D en el marco de la planeación logística; basada en la simulación de eventos discretos. Adicionalmente, los autores proponen un marco de trabajo (framework) para mapear procesos definidos por el usuario entre la simulación y la visualización del modelo.

Por otro lado, en el contexto de trabajo en las bodegas de picking de órdenes, Reif, Günthner, Schwerdtfeger, y Klinker [11] desarrollaron un Sistema llamado Pick-by-Vision, que utiliza realidad aumentada por medio de unas gafas o Head-Mounted Display. Los autores evaluaron la experiencia de usuario y el desempeño de los operarios de logística utilizando el sistema, y concluyeron que aquellos operarios que utilizaron el sistema Pick-by-Vision, lograron completar las ordenes en un menor tiempo y adicionalmente lograron completar estas con menos errores en comparación con el uso de listados en papel. En su trabajo, Cirulis y Ginters [12] plantean que la logística se puede beneficiar mucho de la realidad aumentada, debido a que pueden guiar a un operario durante su recorrido en la bodega. En este sentido, los autores proponen el uso de algoritmos de búsqueda de la ruta más corta, combinados con el uso de gafas de realidad aumentada; para mejorar los tiempos de recolección de productos y reducir errores. En línea con estas ideas, en su trabajo Ginters y Martin-Gutierrez [13] proponen una aplicación que combina RFID con realidad aumentada, para reducir la cantidad de errores durante la identificación de productos en una bodega.

De igual forma, bajo la premisa de reducir el tiempo para completar una tarea y reducir los errores, Sarupuri, Lee, y Billinghamurst [14] desarrollaron una aplicación con realidad aumentada que le ayuda a los operarios de montacargas en la tarea de alinear el montacargas, para poder recoger los pallets de forma correcta. A partir de un estudio de usuario, los autores concluyeron que el sistema les permitía a los operarios completar la tarea con mayor precisión y que el sistema proporcionaba buenos niveles de usabilidad. Por otro lado, en su artículo, Ciuffini, Di Cecca, Ferrise, Mapelli y Barella [15] analiza el uso de la realidad aumentada para optimizar procesos de logística en siderúrgicas, para reducir costos de operación de las plantas e incluso para mejorar el diseño de estas. Adicionalmente, los autores plantean que la realidad aumentada también se podría utilizar para la organización de las bodegas, donde se almacena la materia prima de la siderúrgica, de tal forma; que se pueda optimizar el espacio y ahorrar costos de almacenamiento.

Stoltz y otros [9] identificaron algunos beneficios potenciales de la realidad aumentada en el área de la logística. Los autores plantean que los principales beneficios potenciales de esta tecnología en la logística son: 1) Reduce la tasa de errores, porque les permite a los operarios recordar más fácilmente las acciones que deben llevar a cabo en las bodegas y les permite reconocer más fácilmente los productos que deben seleccionar, debido a que la tecnología les puede mostrar fotos del producto. 2) Proporciona más flexibilidad, porque los operarios pueden tener las dos manos libres para manipular los productos cuando utilizan unas gafas de realidad aumentada. Adicionalmente, los operarios tienen la información en todo momento mientras realizan su trabajo y no tienen que hacer desplazamientos adicionales para ir a una estación y reconocer los productos. 3) Mejora la confiabilidad, porque los operarios pueden cometer menos errores, dado que el sistema es una ayuda importante durante los procesos en las bodegas y las gafas podrían ayudar a compartir fotos o videos de algún producto, con personas que están distantes para validar determinada información de un producto. 4) El sistema se adapta al espacio de trabajo, no requiriendo un ambiente especial para utilizar un sistema de realidad aumentada por medio de gafas. 5) Mejora la seguridad, porque el operario tiene las manos libres y puede realizar acciones más precisas sobre los productos para evitar accidentes. 6) Mejora la motivación de los trabajadores, por la incorporación de tecnologías nuevas para apoyar su trabajo.

Stoltz y otros [9] también identificaron algunas limitaciones del uso de la realidad aumentada por medio de gafas en una bodega. Por ejemplo: 1) los dispositivos actuales no tienen baterías de larga duración que puedan funcionar durante todo un día de trabajo. Adicionalmente, para algunas aplicaciones que requieran el reconocimiento de imágenes específicas, el procesamiento de los dispositivos puede tomar más tiempo y hacer que las operaciones sean más demoradas. Adicionalmente, los dispositivos se podrían sobrecalentar después de un tiempo. 2) Algunos ambientes de programación para este tipo de aplicaciones no están estandarizados o aún están en proceso de desarrollo, por lo que puede ser difícil para una empresa el desarrollo de su propia aplicación. También, las gafas en algunas ocasiones no reconocen los cambios de luz de los ambientes. 3) Algunas personas no están dispuestas a utilizar dispositivos con cámara y micrófono todo el tiempo durante su labor, debido a aspectos de confidencialidad. 4) El costo de algunas de las gafas aún es alto en comparación con otras soluciones para el trabajo en bodegas.

A partir de las investigaciones disponibles que se han reportado anteriormente, se puede concluir que, a pesar de los diferentes avances de la realidad aumentada en el área de la logística, la realidad aumentada aún se encuentra en una fase inicial en cuanto a su aplicación en este campo y, por lo tanto, se requiere de más investigaciones que permitan determinar las verdaderas potencialidades de esta tecnología para apoyar la logística.

Por otro lado, en el área de la educación, la realidad aumentada ha demostrado ser una tecnología que puede favorecer; el desempeño académico de los estudiantes y su motivación para aprender un tema [16, 17]. Esta tecnología ha sido utilizada en diversas áreas de la educación para mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje. Sin embargo, la investigación en cómo la realidad aumentada puede favorecer el entrenamiento o formación en el área de la logística, aún es escasa o muy limitada. Como consecuencia existe una brecha de conocimiento en este sentido. Por este motivo, la presente investigación pretende contribuir a cubrir una parte de esta brecha de conocimiento, mediante el desarrollo de una aplicación para favorecer el proceso de aprendizaje de la gestión de bodegas, que hace parte del tema de logística en el área de la ingeniería industrial. De acuerdo con nuestro conocimiento del estado del arte, esta es la primera aplicación que se desarrolla para este propósito, utilizando la tecnología de realidad aumentada que ha demostrado beneficios positivos en la educación en los últimos años.

3. LOGISTIK – APLICACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA

LogistiK es una aplicación móvil de realidad aumentada basada en marcadores, es decir, que utiliza una imagen (o marcador) para poder posicionar la información aumentada (Figura 1). Este tipo de realidad aumentada facilita la ejecución de la aplicación en dispositivos con pocos recursos, debido a que no debe hacer un reconocimiento de imágenes que requiera demasiados recursos computacionales. El componente de realidad aumentada de la aplicación fue desarrollado en Unity bajo lenguaje C# y utilizando la librería Vuforia. Los demás componentes de la aplicación fueron desarrollados en Android Studio. LogistiK fue desarrollada como una herramienta de soporte al proceso de enseñanza del tema de gestión de almacenes de picking en el campo de la logística del área de la ingeniería Industrial. LogistiK fue desarrollada para el sistema operativo Android en su versión 4.4 (Android KitKat) o superior.



Figura 1. Marcador de realidad aumentada y vista en realidad aumentada de la bodega

El componente principal de la aplicación es el módulo de realidad aumentada, donde los estudiantes tendrán que elaborar una ruta dentro de una bodega de picking. Estos, tendrán que recoger una serie de pedidos distribuidos por toda la bodega; haciendo uso del panel táctil de sus teléfonos para mover un montacargas situado en la esquina de la bodega. Los niveles son establecidos previamente por los docentes. La Figura 1, muestra el marcador de realidad aumentada a la izquierda y a la derecha el modo en el que los estudiantes ven la bodega en realidad aumentada. La Figura 2, muestra un teléfono móvil que apunta al marcador de realidad aumentada. Aquí, se puede apreciar con más detalle la bodega. Más adelante, en esta sección, se proporcionan más detalles sobre este módulo.



Figura 2. Teléfono móvil apuntando al marcador de realidad aumentada, visualizando la bodega

La aplicación le ofrece al estudiante cuatro métodos de autenticación (Correo, Google, Facebook y Twitter). Es libre elección del usuario elegir el método con el cual desea realizar su autenticación. Tener en cuenta que solo es posible registrar una cuenta con un único correo electrónico. Si se usan distintos métodos de autenticación con la misma cuenta de correo, la aplicación solo dará acceso al primer método de autenticación utilizado. La autenticación permite identificar a los estudiantes que están utilizando la aplicación, de tal forma que el profesor pueda tener mayor control sobre la actividad. La Figura 3 muestra una captura de pantalla de la interfaz de inicio de sesión.



Figura 3. Interfaz de inicio de sesión de la aplicación

Si el usuario decide no utilizar ninguno de los métodos de autenticación descritos anteriormente, una vez ubicado en la pantalla de inicio de sesión de la aplicación, puede hacer clic al final en el enlace *Regístrate*, donde debe diligenciar un formulario con todos los datos. La aplicación tiene definido un rol de docente. Este es otorgado por el administrador de la aplicación, y le permite ver el listado de estudiantes que están usando la aplicación actualmente. Para ello, la aplicación tiene una sección denominada *Estudiantes*, como se muestra en la Figura 4.

La aplicación tiene una opción para que el docente pueda ver los niveles disponibles. Un nivel corresponde a un ejercicio de recogida de paquetes en la bodega de picking. Como se mencionó anteriormente, el estudiante controla el montacargas por medio de la pantalla táctil del celular y lo dirige por toda la bodega hasta recoger todos los paquetes indicados. El objetivo es que los estudiantes encuentren la mejor ruta para recoger todos los paquetes. La Figura 5 muestra la interfaz del listado de niveles a la que tiene acceso el profesor.



Figura 4. Listado de estudiantes que están usando la aplicación



Figura 5. Listado de niveles creados por el profesor en la aplicación

Adicionalmente, el docente puede crear nuevos niveles. Cuando se va a crear un nuevo nivel, la aplicación solicita el nombre y la descripción del nivel como se muestra en la Figura 6. Una vez el profesor presiona el botón *Seleccionar Cajas*, debe definir en qué posiciones de la bodega de *picking* colocará los paquetes que deben recoger los estudiantes. Para ello, el profesor utiliza la interfaz que se muestra en la Figura 7 (a la izquierda), que muestra una plantilla que representa la bodega en vista superior. Aquí, el profesor selecciona las posiciones donde desea que haya paquetes en ese nivel. El resultado será el que se muestra en la misma Figura 7 (a la derecha). De esta forma se pueden crear los niveles con diferente grado de dificultad.

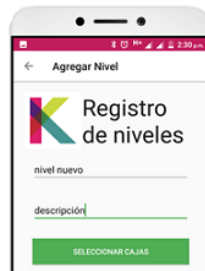


Figura 6. Opción para crear nuevos niveles

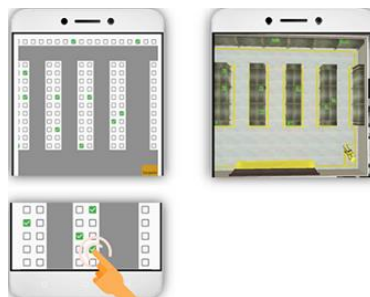


Figura 7. Plantilla para definir las posiciones de las cajas en la bodega y resultado de la creación del nivel

Una vez se crea el nivel, este permite editar la posición de las cajas o los datos del mismo, tales como; nombre y descripción del nivel. Esto se logra utilizando la interfaz que se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Interfaz de edición de un nivel creado por el docente

El estudiante puede acceder a los niveles disponibles en la aplicación, autenticándose primero y luego accediendo a la sección *Niveles* como se muestra en la Figura 9. En la parte inferior aparecerá la lista de niveles registrados en la aplicación con su título, descripción, creador y fecha de creación. Una vez ubicado el nivel que desea realizar, el usuario deberá hacer clic en el botón *Play* que se encuentra en la parte superior derecha de cada nivel (ver Figura 9).



Figura 9. Interfaz de ejecución de niveles

Seguido de lo anterior, inicia el modulo de realidad aumentada de la aplicación. Para iniciar el nivel, deberá de ubicar el marcador impreso en un lugar estable y plano (ver Figura 10 al lado izquierdo), seguido de esto enfocarlo con el lente de la camara del telefono para poder ver la bodega en modo de realidad aumentada (Ver Figura 10 al lado derecho). Una de las mayores ventajas de esta visualización es que los estudiantes pueden observar la bodega en tres dimensiones, para poder analizar la mejor ruta para recoger las cajas definidas. Por otro lado, este modo aprovecha las capacidades de la realidad aumentada proporcionandole al estudiante una experiencia más movitante [16, 17, 18] y más interesante, comparada con el uso de materiales tradicionales, como lapiz y papel, para este tipo de ejercicios. Desde la aplicación, el estudiante puede descargar el marcador para imprimirlo y utilizarlo.

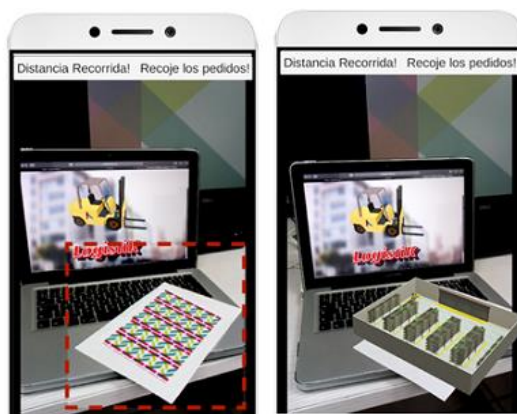


Figura 10. Modo de realidad aumentada y reconocimiento del marcador

La manera correcta de indicarle al montacargas la ruta que debe tomar es colocando y sosteniendo el dedo en el panel táctil del teléfono, indicando el destino del montacargas hasta que este llegue a dicho punto (Figura 11). En la sección superior de la pantalla se indicará cuantos metros se han recorrido en la bodega hasta el momento y el número de cajas recolectadas por el montacargas.

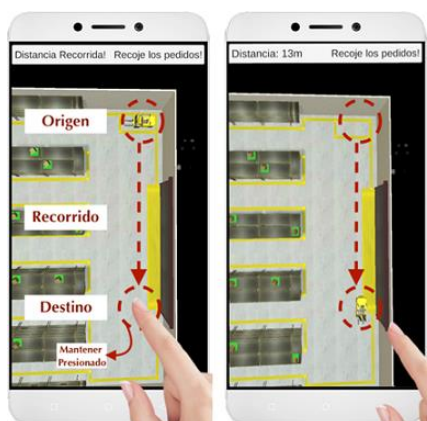


Figura 11. Uso de la pantalla táctil para dirigir el montacargas en el modo de realidad aumentada.

Para recolectar los pedidos establecidos por el nivel, se debe pasar el montacargas en frente del pedido que se desea recolectar. Una vez es recolectado, se incrementará el contador de pedidos localizado en la parte superior de la vista (Figura 12).

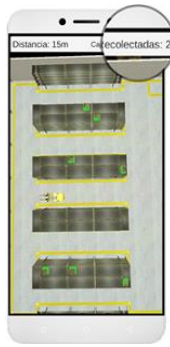


Figura 12. Indicador de cantidad de cajas recolectadas en el modo de realidad aumentada.

Una vez recolectados todos los paquetes del nivel, aparecerá una vista donde se indicará el resultado obtenido al finalizar el nivel. Además, aparecerá una lista con resultados de intentos previos y otra con la tabla general que incluye los resultados de todos los estudiantes de clase. Esto, permite que el estudiante compare los resultados que ha obtenido con los de los demás participantes, y así, pueda reflexionar sobre su desempeño en cada nivel o colaborar con sus compañeros, para obtener un mejor resultado por medio de la comparación de las rutas elegidas. La Figura 13, muestra la interfaz de la aplicación donde el estudiante puede visualizar el resultado de la distancia total recorrida en el nivel y los intentos anteriores en ese nivel. La Figura 14, muestra los intentos (en este caso, un intento) hechos por el estudiante y la tabla general de intentos de los demás estudiantes que están usando la aplicación.

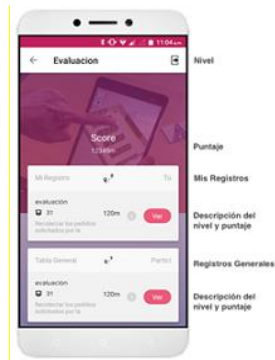


Figura 13. Interfaz de visualización de resultados

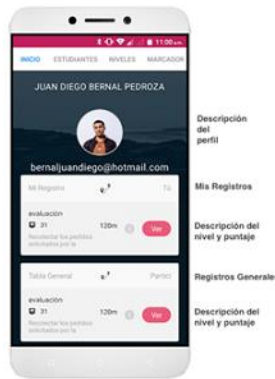


Figura 14. Interfaz de visualización de intentos¹

4. MÉTODO

4.1 Diseño de investigación y participantes

En este estudio se adoptó la metodología de investigación basada en diseño (design-based research, en inglés) mediante la cual es posible desarrollar un artefacto tecnológico, a través de múltiples iteraciones con usuarios reales, determinando así su efecto como innovación educativa [19]. En de cada iteración, el artefacto tecnológico se va mejorando incrementalmente hasta lograr una versión estable. En este trabajo, se presentan los resultados de una de las interacciones de desarrollo, en la cual se evaluó la aceptación y usabilidad de la aplicación llamada LogistiK. El grupo de estudio de la investigación estuvo compuesto por 40 estudiantes de cursos de logística, en último año de la carrera de ingeniería industrial, en 3 universidades privadas de la ciudad de Bogotá para el semestre 2019-1, a quienes se le aplicó el instrumento desarrollado.

¹ Esta imagen (rostro) corresponde a uno de los autores, el cual consiente su difusión

4.2 Instrumentos y procedimiento de investigación

El instrumento utilizado en el estudio fue desarrollado con una escala de Likert. Este instrumento nos permitió recolectar información sobre usabilidad y aceptación de la aplicación por parte de los estudiantes. El cuestionario propuesto se basa en 19 preguntas adaptadas de los instrumentos diseñados y validados por Huang y Liao [20] y Wild [21]. Las seis dimensiones que fueron adaptadas a nuestro estudio se enuncian a continuación. Estas dimensiones permiten evaluar el nivel de aceptación de una aplicación de RA de forma confiable.

1. *Escala de usabilidad*: Esta escala permite evaluar la usabilidad de un sistema, en este caso la aplicación desarrollada.
2. *Validez ecológica*: Está definido como el grado en que el usuario percibe aspectos de la realidad en un ambiente simulado.
3. *Facilidad percibida de uso*: Es el grado en que la cantidad de recursos cognitivos, que demanda el uso de la tecnología, tiende a ser lo más bajo posible.
4. *Compromiso*: Hace referencia a la atracción que genera la aplicación durante su uso.
5. *Utilidad percibida*: Es la percepción de la tecnología como un elemento más útil que otras tecnologías o recursos.
6. *Estética*: Se define como el grado de atracción visual y entretenimiento percibido por el usuario.

En cada universidad donde se llevó a cabo el estudio, se realizó el siguiente procedimiento de investigación que consta de seis pasos. Notar que el correcto uso de la aplicación se garantiza con la presentación previa, por parte del docente, de la tematica llamada configuración de almacenes y centros de distribución. Aquí, se estudian varios algoritmos heurísticos de enrutamiento, para encontrar rutas de recolección de pedidos más cortas. Estos métodos de ruteo en almacenes son desarrollados posteriormente, por los estudiantes, en la aplicación basada en RAM diseñada en esta investigación.

1. Presentación formal de la aplicación móvil de realidad aumentada diseñada, donde se muestra el problema de aplicación que aborda, los objetivos y la motivación que se persigue con el uso de la misma.
2. Explicación detallada de los pasos a seguir para descargar, a través de GOOGLE PLAY, la aplicación móvil de realidad aumentada LogistiK. Además, se presentan las diversas opciones para iniciar sesión.
3. Presentación del menú de opciones con que cuenta la aplicación móvil de realidad aumentada desarrollada. Aquí, se hace una demostración detallada del uso de LogistiK para rutear pedidos en una bodega de ejemplo. El estudiante observa como interactúa la aplicación móvil con el marcador diseñado.
4. Entrega a cada estudiante del marcador de realidad aumentada para utilizar en LogistiK. En este punto, se le pide al estudiante llevar a cabo las instrucciones presentadas en los pasos 2 y 3. Para esto, se dispondrán de 15 minutos que permiten al estudiante familiarizarse con el uso de la aplicación, además, resolver algunos apartes que pudieron quedar inconclusos en los pasos explicados previamente.
5. Explicación detallada del ejercicio diseñado por el profesor de la asignatura. Este deberá ser desarrollado por los estudiantes, en un tiempo máximo de 20 minutos, utilizando la aplicación móvil de realidad aumentada diseñada.
6. Diligenciamiento del instrumento de investigación diseñado. Este lo realiza el estudiante al final de la prueba presentada en el paso 5.

Finalmente, toda la información recolectada mediante el instrumento diligenciado en el paso 6 es sistematizada. Con este instrumento se pretende recopilar información sobre las percepciones de los estudiantes con respecto a la aceptación y usabilidad de la aplicación móvil de realidad aumentada desarrollada. El análisis de los resultados para la información recolectada se reporta detalladamente en la siguiente sección.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, la Tabla 1 presenta los resultados de los valores medios μ y de desviación estándar σ para cada dimensión evaluada en la sección anterior.

Tabla 1. Resultados de los valores medios μ y de desviación estándar σ para cada dimensión evaluada

	Escala de Usabilidad	Validez Ecológica	Facilidad Percibida de Uso	Compromiso	Utilidad Percibida	Estética
μ	3,97	4,00	4,20	4,53	4,70	4,46
σ	0,58	0,50	0,50	0,47	0,43	0,52

En estos resultados el valor mínimo de la escala es 1 y el valor máximo posible es de 5. La aceptación y usabilidad de la aplicación LogistiK para las seis dimensiones evaluadas puede verse claramente en la Figura 13.

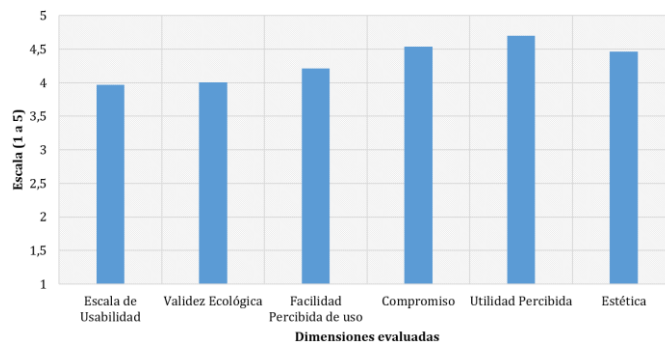


Figura 13. Usabilidad y aceptación de aplicación para las dimensiones evaluadas

En general, los resultados obtenidos fueron prometedores con respecto a la usabilidad y aceptación de la aplicación móvil de realidad aumentada diseñada. Las dimensiones de acuerdo con su orden de puntuación desde el resultado más alto al resultado más bajo son: utilidad percibida, compromiso, estética, facilidad percibida de uso y validez ecológica. A continuación, se discutirán los resultados obtenidos para cada dimensión.

- *Utilidad percibida.* Esta dimensión obtuvo los mejores resultados ($\mu=4,7$; $\sigma=0,43$), lo que significa que *los estudiantes perciben la aplicación como un elemento útil para su proceso de aprendizaje sobre el tema de la gestión de almacenes en el área de logística*. Este resultado concuerda con otros autores, que previamente han confirmado que: esta dimensión tiene un impacto positivo sobre la intención de uso futuro de las aplicaciones de RA [22].
- *Compromiso.* Esta dimensión presentó un resultado muy alto ($\mu=4,53$; $\sigma=0,47$), lo que muestra que *los estudiantes se sintieron atraídos por la aplicación durante su uso y consideraron que estarían dispuestos a utilizar la aplicación si esta tuviera más funcionalidades o más temas*. Este resultado confirma los resultados obtenidos por otros investigadores, que previamente han demostrado que: las aplicaciones de RA en educación favorecen la motivación y el compromiso de los estudiantes [18, 23, 24, 25].
- *Estética.* Esta dimensión también obtuvo un resultado alto ($\mu=4,46$; $\sigma=0,52$), lo que muestra que *los estudiantes percibieron que la aplicación tiene una muy buena apariencia visual y que es atractiva para ser utilizada durante el proceso de aprendizaje en la asignatura de logística*.
- *Facilidad percibida de uso.* Esta dimensión presentó un resultado alto ($\mu=4,2$; $\sigma=0,5$), lo que establece que el esfuerzo de aprender a utilizar la aplicación fue muy bajo por lo que la aplicación pudo ser dominada rápidamente por parte de los estudiantes. Este resultado puede explicarse por el hecho que la aplicación se intentó desarrollar para que ser lo más intuitiva posible y, así, reducir la carga cognitiva necesaria para utilizarla. Es decir, hacer que los estudiantes se enfocarán más en los ejercicios que proporciona la aplicación. Este resultado podría demostrar que *los estudiantes tienen una percepción positiva sobre la intención de uso de la aplicación a futuro* y esta conclusión se explica a partir de evidencia obtenida a partir de investigaciones en RA, que han concluido que: la facilidad de uso está fuertemente ligada con la intención futura de uso de la aplicación y a la dimensión de compromiso [26].
- *Validez ecológica.* Esta dimensión también obtuvo un resultado alto ($\mu=4,0$; $\sigma=0,5$). Sin embargo, en comparación con las demás dimensiones este resultado no es tan alto. Una interpretación de este resultado es que esta dimensión evalúa el nivel de realidad que el usuario percibe cuando utiliza la aplicación de realidad aumentada. Sin embargo, la aplicación de RA proporciona la mayor cantidad de información de forma virtual, generando un cierto nivel de inmersión en la bodega donde se desarrollan los ejercicios; por lo que la percepción de realidad es más baja en la aplicación móvil de realidad aumentada diseñada. En consecuencia, *los usuarios percibieron un nivel bajo de realidad durante el uso de esta aplicación*.
- *Escala de usabilidad.* Esta dimensión obtuvo el resultado más bajo ($\mu=3,97$; $\sigma=0,58$), lo que puede explicarse por el hecho de que la realidad aumentada aún presenta diversos inconvenientes de usabilidad debido a que: *en muchos casos es muy difícil mantener la información superpuesta en los objetos como consecuencia de la iluminación del área, la resolución de la cámara del dispositivo móvil, su capacidad de procesamiento o la interacción con el usuario es difícil de realizar; porque se debe mantener la posición del dispositivo de forma correcta y al mismo tiempo interactuar con la información aumentada*. Este resultado abre posibilidades para investigaciones futuras en el campo de la usabilidad de aplicaciones en RA.

Limitaciones de este estudio

En este trabajo se presenta la aplicación móvil de realidad aumentada LogistiK y el estudio de usabilidad y aceptación de la aplicación por parte de los estudiantes. Sin embargo, en este estudio no se ha evaluado el impacto sobre el proceso de aprendizaje de los estudiantes con esta herramienta, por lo que no se puede afirmar aún que la aplicación mejora el aprendizaje de los estudiantes. Esta fase de evaluación constituye el siguiente paso a evaluar en la aplicación de realidad aumentada diseñada.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este estudio se reporta la fase de evaluación de usabilidad y aceptación de la aplicación LogistiK, una aplicación móvil de realidad aumentada desarrollada para apoyar el proceso de aprendizaje, del tema de gestión de almacenes en el área de logística, que se imparte en los programas de ingeniería industrial. Este capítulo tiene dos contribuciones principales: 1) se introduce una aplicación móvil con realidad aumentada, diseñada en conjunto con profesores de ingeniería industrial, como parte de un proceso apoyado en la metodología de investigación basada en diseño. Hasta donde se sabe, esta es la primera aplicación móvil con realidad aumentada que se crea para apoyar la enseñanza del tema de gestión de almacenes en el área de la logística. 2) se evaluó la usabilidad y aceptación de la aplicación por parte de 40 estudiantes de 3 universidades donde se imparte esta asignatura, con objeto de determinar las posibilidades que tienen este tipo de aplicaciones con RA para ser utilizadas a futuro, como parte de la enseñanza de esta temática de forma más didáctica.

A partir de la evaluación, se pudo concluir que en general los estudiantes tienen percepciones muy positivas sobre el uso de una aplicación de este tipo, para apoyar su proceso de aprendizaje en el área de la ingeniería industrial. De mayor a menor calificación las dimensiones evaluadas fueron las siguientes: utilidad percibida, compromiso, estética, facilidad percibida de uso, validez ecológica y usabilidad del sistema. Los resultados confirman la aceptación que genera entre los estudiantes este tipo de aplicaciones, para apoyar su proceso de aprendizaje y dinamizar las clases, a diferencia de la presentación de estos contenidos de forma tradicional utilizando un libro o fotocopias. En particular, hemos comprobado que, para la enseñanza del tema de gestión de almacenes en el área de logística, una aplicación con realidad aumentada favorece la aceptación y compromiso por parte del estudiante. Sin embargo, como trabajo futuro es necesario realizar una evaluación de tipo experimental y por un lapso de tiempo mayor, para poder determinar si la aplicación también puede incrementar los niveles de conocimiento de los estudiantes en este tema, comparado con los materiales tradicionales.

Este estudio de usabilidad, además, permitió identificar algunos aspectos de mejora en la aplicación, que fueron incluidos en el desarrollo como parte de la siguiente iteración de la metodología. Como trabajo futuro, en la parte de realidad aumentada se puede implementar una animación para mostrar de una forma más real cuando el montacargas recoge la mercancía de cada uno de los estantes de la bodega.

REFERENCIAS

- [1] N. Majid, H. Mohammed, and R. Sulaiman, "Students' perception of mobile augmented reality applications in learning computer organization," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 176, Feb., pp. 111–116, 2015.
- [2] R. Azuma, "A survey of augmented reality," *Presence-Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, 1997.
- [3] K. Panneta, "5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies," *gartner.com*, para. 2, Jan. 31, 2018. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>. [Accessed: Mar. 05, 2019].
- [4] D. Waters, *Global Logistics: New Directions in Supply Chain Management*, 6th ed. London Kogan Page, 2010.
- [5] D. Mourtzis, V. Samothrakis, V. Zogopoulos, and E. Vlachou, "Warehouse design and operation using augmented reality technology: a papermaking industry case study," *Procedia CIRP*, vol. 79, pp. 574–579, 2019.
- [6] Establish Inc., "Logistic Cost and Service," *Global Conference, CSCMP-2010*. [Online]. Available: <https://www.establishinc.com/case-studies/warehouse-design-improvements>. [Accessed: Nov. 20, 2010].
- [7] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. Macintyre, "Recent advances in augmented reality," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 21, no. 6, pp. 34–47, 2001.
- [8] D. van Krevelen and R. Poelman, "A survey of augmented reality technologies, applications and limitations," *Int. J. Virtual Real.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–20, 2010.
- [9] M.-H. Stoltz, V. Giannikas, D. McFarlane, J. Strachan, J. Um, and R. Srinivasan, "Augmented reality in warehouse operations: opportunities and barriers," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, Jul., pp. 12979–12984, 2017.
- [10] S. Wenzel and U. Jensen, "The integration of 3D visualization into the simulation-based planning process of logistics systems," *Simulation*, vol. 77, no. 3–4, pp. 114–127, 2001.
- [11] R. Reif, W. A. Günthner, B. Schwerdtfeger, and G. Klinker, "Evaluation of an augmented reality supported picking system under practical conditions," *Comput. Graph. Forum*, vol. 29, no. 1, pp. 2–12, 2010.
- [12] A. Cirulis and E. Ginters, "Augmented reality in logistics," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 26, no. Dec, pp. 14–20, 2013.
- [13] E. Ginters and J. Martin-Gutierrez, "Low cost augmented reality and RFID application for logistics items visualization," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 26, no. Dec, pp. 3–13, 2013.
- [14] B. Sarupuri, G. Lee, and M. Billingham, "An augmented reality guide for assisting forklift operation," In: *Proc. 2016 IEEE Int. Symp. Mix. Augment. Reality, ISMAR-Adjunct, 2017*, pp. 59–60.
- [15] A. F. Ciuffini, C. Di Cecca, F. Ferrise, C. Mapelli, and S. Barella, "Application of virtual/augmented reality in steelmaking plants layout planning and logistics," *Metall. Ital.*, vol. 2016, no. 7, pp. 5–10, 2016.
- [16] J. Bacca, S. Baldiris, R. Fabregat, S. Graf, and Kinshuk, "Augmented reality trends in education: a systematic review of research and applications," *J. Educ. Technol. Soc.*, vol. 17, no. 4, pp. 133–149, 2014.
- [17] M. Akçayır and G. Akçayır, "Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature," *Educ. Res. Rev.*, vol. 20, Feb., pp. 1–11, 2017.
- [18] J. Bacca, S. Baldiris, R. Fabregat, and Kinshuk, "Insights into the factors influencing student motivation in augmented reality learning experiences in vocational education and training," *Front. Psychol.*, vol. 9, Aug., pp. 1–14, 2018.

- [19] F. Wang and M. J. Hannafin, "Design-based research and technology-enhanced learning environments," vol. 53, no. 4, pp. 5–23, 2005.
- [20] T. Huang and S. Liao, "A model of acceptance of augmented-reality interactive technology: the moderating role of cognitive innovativeness," *Electron. Commer. Res.*, vol. 15, no. 2, Jun., pp. 269–295, 2015.
- [21] F. Wild, R. Klemke, P. Lefrere, M. Fominykh, and T. Kuula, "Technology acceptance of augmented reality and wearable technologies," in *iLRN 2017: Immersive Learning Research Network*, vol. 840, no. November, pp. 129–141, 2017.
- [22] R. Wojciechowski and W. Cellary, "Evaluation of learners' attitude toward learning in ARIES augmented reality environments," *Comput. Educ.*, Mar, pp. 1–16, 2013.
- [23] T. H. C. Chiang, S. J. H. Yang, and G.-J. Hwang, "An augmented reality-based mobile learning system to improve students' learning achievements and motivations in natural science inquiry activities," *Educ. Technol. Soc.*, vol. 17, no. 4, pp. 352–365, 2014.
- [24] K.-Y. Chin, K.-F. Lee, and Y.-L. Chen, "Impact on student motivation by using a qr-based u-learning material production system to create authentic learning experiences," *IEEE Trans. Learn. Technol.*, vol. 8, no. 4, Oct, pp. 367–382, 2015.
- [25] X. Wei, D. Weng, Y. Liu, and Y. Wang, "Teaching based on augmented reality for a technical creative design course," *Comput. Educ.*, vol. 81, Feb, pp. 221–234, 2015.
- [26] M. B. Ibanez, A. Di Serio, D. Villaran, and C. Delgado-Kloos, "The acceptance of learning augmented reality environments: a case study," in 2016 IEEE 16th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), 2016, pp. 307–311.

Diseño de un algoritmo para solución de un problema de secuenciamiento de N tareas en M máquinas mediante la combinación de las reglas de despacho Earliest Due Date y Longest Processing Time en un ambiente de manufactura flexible

Germán Cock S.¹

Harold S. Cardona Z.²

Pedro D. Medina V.³

Universidad Tecnológica de Pereira – Colombia

El proyecto se basa en un problema de secuenciación de tareas en ambientes de manufactura el cual integra los elementos principales de la producción en la forma de un sistema automatizado bajo los principios de los Sistemas de Manufactura Flexible (FMS). En estos sistemas las máquinas no están forzosamente agrupadas de acuerdo con el tipo de proceso que hacen, sino que se tiene una integración flexible de máquinas. El problema es resuelto a partir de la combinación de dos reglas de despacho, Earliest Due Date (EDD) y Longest Processing Time (LPT) las cuales brindan una ventaja en cuanto a su simplicidad y equidad inherente. Estas reglas brindan un método eficiente para identificar el programa óptimo cuando las operaciones presentan alta variabilidad en los tiempos de configuración, interrupciones, tiempos de procesamiento y cambios en el conjunto de trabajos, y sería prácticamente imposible clasificar todas las vastas alternativas para obtener el mejor programa. El algoritmo realizado para encontrar solución al problema da inicio con el ingreso de datos del ejercicio específico, reconoce dichos datos y las características de este como número de pedidos, número de máquinas, fechas de entrega y tiempos de procesamiento. Estas particularidades son tomadas en cuenta y, basándose en reglas preestablecidas por el usuario, se encontrará la solución óptima basada en el mínimo Makespan. Posterior a esto, la solución que dé mejores resultados será graficada en un Diagrama de Gantt. La herramienta utilizada para la construcción del algoritmo fue el lenguaje de programación Python 3.0 [1] el cual simplifica la programación debido a su estructura amigable y flexible que crea un ambiente simplificado, ordenado y limpio que resulta en una programación productiva y rápida donde su portabilidad y su comunidad están acordes con las necesidades del mercado actual. Con el fin de demostrar las capacidades del algoritmo, se hace uso de un problema con 10x5, 10 trabajos y 5 máquinas, y se comparan escenarios donde la regla de secuenciación cambia de acuerdo con el método que se crea más conveniente. Al final el programa arroja un conjunto de gráficos Gantt para cada posible solución y una tabla de resultados con los indicadores de Tardanza, Tiempo Ocioso de Máquinas y Makespan, a partir de los cuales el analista podrá tomar sus propias decisiones de acuerdo con sus prioridades de planeación.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los sistemas de producción han sufrido una substancial transformación, al pasar de procesos puramente artesanales a procesos altamente industrializados basados en fundamentos computacionales. Estos cambios se han manifestado debido a la necesidad del mercado de producir elementos que permitan satisfacer las necesidades de los individuos y sumados a la exigencia de los consumidores han generado el concepto de personalización del producto [2]. Esta concepción de personalización está basada en una serie de reglas y restricciones en el ciclo de producción donde las empresas además de tener en cuenta los factores convencionales como la capacidad de recibir pedidos, la asignación de recursos y sitios de producción, garantizar el inventario y cumplir con los calendarios de entrega, también han de priorizar un nuevo factor que considere las especificaciones demandadas por los consumidores.

Una solución de programación de taller demuestra ser una propuesta de valor crucial para diseñar los parámetros de los programas de producción y combatir los cuellos de botella, las interrupciones, asegurar ciclos de producción eficientes y adaptarse a los cambios provenientes de la personalización del producto. Debido a que la programación del taller proporciona una visión holística de la planificación del programa, los fabricantes pueden implementar esquemas de producción estratégicos, y ágiles que brindan mayor transparencia en cada punto de contacto de la cadena de valor. En este contexto es donde los sistemas de manufactura flexible surgen como una buena solución que permite la producción de pequeños lotes de forma ágil y económicamente viable. Este sistema se adapta fácilmente a los cambios en el producto que se fabrica y, tanto las máquinas como los sistemas computarizados que lo componen están configurados para fabricar diferentes partes y manejar diferentes niveles de producción, otorgando una considerable ventaja para cambiar rápidamente un entorno de fabricación que dé como resultado mejorar la eficiencia del proceso y, por lo tanto, reducir el costo de producción de la empresa [3].

La flexibilidad proporcionada por un FMS tiene como objetivo la sincronización de las actividades, de forma que maximice la utilización del sistema sin desperdiciar tiempo de preparación al cambiar entre operaciones de manufactura, y efectuando varias operaciones en distintos órdenes y en máquinas diferentes. Existen softwares especializados que han utilizado aproximaciones similares, tal es el caso de Lekin® [4], programa gratuito e intuitivo, que permite la programación de n trabajos en una máquina. La solución proporcionada por Lekin se basa en las reglas de despacho escogida por el usuario, *sin embargo, no permite una combinación de estas que dé como resultado una mejor solución en la secuenciación.*

¹ cook20038@gmail.com, cook@utp.edu.co

² harold.616@utp.edu.co

³ pemedin@utp.edu.co

2. MÉTODO

2.1 Sistemas de Manufactura Flexible (FMS)

Con la aparición de nuevas tecnologías, el concepto de flexibilidad en la fabricación se ha convertido en una consideración clave en el diseño, operación y administración de los sistemas de fabricación. Sin embargo, se han realizado pocos tratamientos sistemáticos rigurosos sobre el tema de la flexibilidad en la fabricación, y aún con menor frecuencia estudios empíricos de las plantas de fabricación, que ofrecen una declaración coherente de las implicaciones estratégicas y tácticas de esta importante dimensión de la fabricación. La flexibilidad es un concepto complejo, multidimensional y de difícil adaptación, además de una consideración importante en el diseño de los sistemas de fabricación. Estos sistemas se han desarrollado en las últimas dos décadas para ayudar a la industria manufacturera a avanzar hacia el objetivo de la flexibilidad. Un FMS combina altos niveles de flexibilidad con alta productividad y bajos niveles de inventario de trabajo en proceso que puede llegar a permitir una producción sin supervisión que se compone de tres elementos principales: máquinas herramientas controladas por computadora; un sistema de transporte automatizado y un sistema de control informático.

El desarrollo de estrategias de programación efectivas y eficientes sigue siendo un área de investigación importante y activa. Para lograr estos beneficios deseables, el sistema de control debe ser capaz de ejercer una gestión de supervisión inteligente donde la programación está en el corazón del sistema de control de un FMS. En el desarrollo de este proyecto se presenta flexibilidad en la programación donde no existe un orden específico de secuenciación en las tareas correspondientes a cada pedido.

2.1.1 Términos y conceptos

Para un esquema de clasificación válido es necesario ser preciso sobre el significado de los términos utilizados. En particular, aquellos términos que se usan de diferentes maneras y que son potencialmente ambiguos necesitan discusión y aclaración. Se anotan las siguientes definiciones y aclaraciones utilizadas en el documento:

- *Operaciones y empleos.* Una operación se define aquí como el procesamiento durante un período de tiempo continuo de una pieza en una máquina. El transporte de partes de una máquina a otra en un FMS se conoce como una operación de transporte. Un trabajo se define aquí como la recopilación de todas las operaciones necesarias para completar el procesamiento de una pieza. Los términos trabajo y parte a menudo se pueden usar indistintamente, ya que generalmente hay una correspondencia uno a uno entre ellos.
- *Programación, secuenciación y despacho.* En el contexto de este trabajo, la programación abarca todas las decisiones relacionadas con la asignación de recursos a operaciones sobre el dominio del tiempo. *Dispatching* se define aquí como el proceso o decisión de determinar la siguiente operación para un recurso cuando el recurso se convierte en libre y determinando el siguiente destino de una parte cuando su operación actual tiene terminado. El despacho es, por lo tanto, un método elemental de programación. La secuenciación es la decisión que determina el orden en que se realizan las operaciones en las máquinas. Para muchos problemas clásicos de programación de una sola máquina, una secuencia determina una programación y, por lo tanto, la programación y la secuenciación se usan a menudo como sinónimos. Sin embargo, esto no es necesariamente cierto en otros entornos y, de hecho, en algunos casos de máquinas individuales. Por ejemplo, cuando se minimiza la anticipación y la tardanza en una sola máquina, la programación y la secuenciación no son sinónimos, ya que los tiempos de inactividad pueden estar presentes en la programación. Con la flexibilidad de enrutamiento, la programación y la secuenciación en los entornos FMS son claramente diferentes. La secuenciación es sólo un aspecto de la programación.
- *Configuración de la máquina, cambio de herramientas, carga y enrutamiento de piezas.* Estos conceptos están estrechamente relacionados y la siguiente discusión aclara la visión adoptada aquí: La configuración de la máquina se define aquí como el proceso o la decisión de asignar herramientas a una máquina, para realizar la siguiente operación, desde su estado inicial o un estado de trabajo que surja de una operación anterior. Un estado de trabajo para una máquina aquí significa un estado bajo el cual puede realizar ciertas operaciones, es decir, la configuración de la herramienta se ha completado para estas operaciones. La carga de la máquina se define como el proceso o la decisión de asignar herramientas a las máquinas antes del inicio de un período de producción con el supuesto de que las herramientas cargadas permanecerán en la máquina durante el período de producción. Esta decisión debe considerar qué operaciones se pueden realizar en cada máquina durante el período. Por lo tanto, la carga de la máquina también incluye la asignación de operaciones a las máquinas.

El enrutamiento de partes se define como el proceso de determinar las máquinas en las que se realizará cada operación para una parte, es decir, determinar la ruta o secuencia de máquinas para cada parte que pasa a través del sistema. Las decisiones de carga de la máquina pueden resultar en una máquina única para cada operación. También puede dar lugar a una situación en la cual una operación se puede realizar opcionalmente en dos o más máquinas, es decir, todas las herramientas requeridas para la operación se asignan en cada una de estas máquinas que se encuentren disponibles.

2.1.2 Factores que afectan la programación en FMS

La programación es la asignación de recursos a lo largo del tiempo para realizar tareas [5]. Esta es una definición bien conocida y muy general. En los entornos de planificación clásicos, solo se considera un tipo de recurso (las máquinas) y el problema de la programación básica se reduce a decidir la asignación de este tipo de recurso para procesar los trabajos. Para desarrollar un sistema de clasificación estructurado para los problemas de programación de FMS, las siguientes preguntas deben abordarse en el nuevo entorno:

- Las decisiones que deben tomarse en los problemas de programación de FMS.
- La forma en que se toman las decisiones de programación de FMS.
- Los factores que afectan las decisiones y cómo se toman.

La programación en sistemas de fabricación flexible debe incluir los siguientes tres aspectos para aprovechar el potencial de flexibilidad del sistema:

1. Configuración de la máquina o cambio de herramienta.
2. Enrutamiento.
3. Secuenciación de operación.

2.2 Secuenciación

La estructura secuencial es aquella en la que una acción (instrucción) sigue a otra en secuencia. Las tareas se suceden de tal modo que la salida de una es la entrada de la siguiente y así sucesivamente hasta el fin del proceso. La secuenciación pura es un problema de programación especializado en el que una ordenación de los trabajos determina completamente una programación, hecho que proporciona un contexto en el que se deben investigar diferentes medidas de rendimiento y varias técnicas de solución. Para comprender completamente el comportamiento de un sistema complejo, es vital entender sus partes, y muy a menudo el problema aparece como parte de un problema de programación más grande. Por lo tanto, es un elemento fundamental en el desarrollo de una comprensión integral de los conceptos de programación.

La programación (secuenciación) de tareas (*scheduling*) es una parte de la investigación de operaciones que se interesa por estudiar la asignación de recursos limitados a un conjunto de trabajos por realizar en un horizonte de tiempo, con el fin de optimizar uno o más objetivos. Es un proceso de toma de decisiones que constituye uno de los problemas más importantes en gestión de la producción, tanto desde el punto de vista teórico como práctico [6]. En los modelos clásicos se considera que toda la información necesaria para establecer la secuencia de ejecución de un conjunto de tareas es conocida desde el instante inicial del horizonte de programación. Se habla entonces de modelos estáticos. Sin embargo, las condiciones actuales de competencia de mercados y algunas aplicaciones específicas en sistemas de producción han obligado a los investigadores a considerar nuevos modelos y métodos de secuenciación de trabajos, esta vez reactivos, adaptativos y, sobre todo, evolutivos en tiempo real, con el fin de satisfacer las nuevas necesidades industriales. De esta manera, se habla de modelos dinámicos [7].

Durante los últimos años, las investigaciones en el área de modelos dinámicos de secuenciación de tareas han tenido un gran desarrollo. Los modelos y algoritmos propuestos están basados tanto en reglas clásicas utilizadas desde hace mucho tiempo por los industriales, como en estrategias más sofisticadas [7]. Puesto que estos algoritmos sólo tienen en cuenta la información disponible en un instante de tiempo dado de toma de decisión, los criterios matemáticos y computacionales para la evaluación de su eficiencia sólo consideran la complejidad y proximidad (competitividad) para el peor de los casos posibles (*worst-case* análisis) [8] y dejan de lado los experimentos computacionales prácticos. La teoría clásica de la programación (secuenciación) de tareas se ha dedicado a estudiar y evaluar la pertinencia de reglas o algoritmos cuando toda la información del grupo de tareas por ejecutar se conoce de manera anticipada. Estos escenarios se han estudiado a partir del concepto de programación en sistemas de fabricación automatizada; método que consiste en describir mediante una estructura jerárquica que abarca desde la toma de decisiones de nivel superior hasta las decisiones de planificación de niveles detallados. La estructura jerárquica de los problemas de planificación y programación de FMS se ha abordado de diferentes maneras, como la programación de nivel superior y detallado [9] y la planificación de la producción a medio plazo en relación con la planificación de la producción a corto plazo.

El primer tipo (la planificación a medio plazo o la programación de nivel superior) hace hincapié en la planificación para la producción y las operaciones de la planta durante períodos prolongados de tiempo que pueden incluir, por ejemplo, la selección del tipo de pieza, la planificación de recursos (como herramientas y accesorios) y la generación de secuencias de operaciones. El objetivo a este nivel es la coordinación de actividades para múltiples áreas de función. La salida de esta función de programación es un plan tentativo o un programa maestro. Establece los objetivos de producción y sirve como base para estimar, planificar y obtener recursos. A nivel detallado, la programación (o planificación de la producción a corto plazo) controla la producción a lo largo de cada día y proporciona un medio para alcanzar los objetivos de producción. Intenta encontrar la ruta óptima de trabajos combinada con hacer un uso

eficiente de recursos costosos que están sujetos a restricciones ambientales y de procedimiento. Estos objetivos se logran mediante la asignación de recursos tales como máquinas herramienta, accesorios y materias primas según el tiempo (fechas de vencimiento) y las restricciones de lugar (enrutamiento) [10]. Los trabajos se asignan a estaciones específicas (*work stations*) de forma semanal, diaria o por hora, teniendo en cuenta el tipo, la cantidad y la ubicación de los recursos, así como los valores de tiempo asociados y las prioridades de procesamiento. En este nivel, el problema de programación plantea un problema único y desafiante de varias maneras.

Tanto en la academia como en la práctica el problema de secuenciación de tareas en una máquina simple. Estas reglas se analizan desde el punto de vista teórico. De otro lado, se pretende presentar un estudio experimental, basado en datos (instancias) generados computacionalmente, que permita analizar el comportamiento de estas reglas (algoritmos) de secuenciación en un ambiente dinámico.

2.3 Reglas de despacho

Las reglas de despacho proporcionan pautas para la secuencia en la que se deben procesar los trabajos, generalmente implican el supuesto de que el costo y el tiempo de configuración del trabajo son independientes de los tiempos de procesamiento. Al hacer uso de ellas, los tiempos de procesamiento de los trabajos y las fechas de vencimiento son piezas importantes de información. Los tiempos de trabajo por lo general incluyen tiempos de configuración y procesamiento. Las fechas de vencimiento pueden ser el resultado de los tiempos de entrega prometidos a los clientes, el procesamiento de MRP o las decisiones administrativas. Su finalidad consiste en minimizar el tiempo de finalización, la cantidad de trabajos en el sistema y el retraso en el trabajo, al tiempo que maximiza la utilización de las instalaciones.

El proceso de determinar qué trabajo se inicia primero en una máquina o centro de trabajo en particular se conoce como secuenciación o secuencia de prioridad. Las reglas de prioridad son los criterios por los cuales se determina la secuencia de trabajo. Estos pueden ser muy simples, requiriendo solo que los trabajos sean secuenciados de acuerdo con un dato, tales como tiempo de procesamiento, fecha de vencimiento o el orden de llegada. Otras reglas, aunque igualmente sencillas, pueden requerir varias piezas de información para obtener un número índice, como en la regla de holgura mínima y la proporción crítica. Otros, como la regla de Johnson, se aplican a la programación de trabajos en una secuencia de máquinas y requieren un procedimiento computacional para especificar el orden de desempeño. Las siguientes medidas estándar de rendimiento de la programación se utilizan para evaluar las Reglas de prioridad:

1. Cumplimiento de fechas de vencimiento de clientes.
2. Minimizar el tiempo de flujo (el tiempo que un trabajo pasa en el proceso).
3. Minimizar el inventario de trabajo en proceso.
4. Minimizar el tiempo de inactividad de las máquinas o trabajadores.

Las reglas de despacho se han estudiado ampliamente en el entorno de servidor único. Los modelos de servidor único se discuten por Baker [4]. Las reglas de despacho más comunes para secuenciar trabajos son:

1. *FIFO* (First In First Out): Es una de las reglas de prioridad más utilizada y considera atender los trabajos según orden de llegada.
2. *LIFO* (Last In First Out): Se atienden los trabajos en orden inverso al orden de llegada.
3. *SPT* (Shortest Processing Time): Los trabajos se procesan en orden ascendente iniciando por los de menor tiempo de proceso.
4. *LPT* (Largest Processing Time): Los trabajos se procesan en orden decreciente de tiempo de proceso. Esta regla ordena los trabajos en orden de tiempos de procesamiento de mayor a menor. Cuando se libera una máquina, el trabajo más grande que esté listo en ese momento comenzará a procesarse. Programa los trabajos más largos primero, de modo que ningún trabajo grande "sobresalga" al final del cronograma y prolongue dramáticamente el tiempo de finalización del último trabajo.
5. *EDD* (Earliest Due Date): Los trabajos se atienden por fecha de entrega, es decir, secuencia los trabajos en una cola de acuerdo con sus fechas de vencimiento.

2.4 Heurística de partes

La aproximación al problema de secuenciación en sistemas de manufactura flexible, a partir de la combinación de reglas de despacho, surge al estudiar el problema de formación de lotes de partes dentro de un FMS [11]. Este sistema de producción considera principalmente la asignación de operaciones y herramientas asociadas a máquinas. En este contexto se presenta un ambiente donde el conjunto de herramientas necesarias para la elaboración de las partes asignadas al sistema es mayor que la capacidad de éste para almacenarlas. Para el tratamiento de este ambiente se hace necesario combinar las piezas en lotes, el sistema es entonces configurado para manufacturar un lote, y cuando

todas las partes que se programaron en dicho lote se han terminado de fabricar, las máquinas serán preparadas de nuevo y se iniciará la producción del siguiente. Tan pronto como la fabricación de un tipo de pieza dentro de cualquier lote es finalizado, se inicia la manufactura de otro tipo de parte, y cualquier herramienta necesaria para la fabricación de ese tipo de pieza será cargada automáticamente por los elementos componentes del sistema. Por lo tanto, el objetivo del problema de selección de piezas es la ubicación de las partes que se necesiten en lotes compatibles, cada lote deberá usar todas las máquinas del sistema, requerir un número limitado de herramientas y las piezas que lo componen tener fechas de entrega similares.

2.5 Pseudocódigo

El esquema mostrado a continuación ilustra las entradas, salidas y los comandos generales de flujo lógico utilizados en la programación del algoritmo en Python.

Definición de variables

Job ← Número de pedidos o trabajos
Maq ← Número total de máquinas
EDD ← Fecha de entrega de cada pedido
Lotes ← Número de lotes requeridos por pedido
lpt ← Tiempo total del procesamiento por todas las máquinas

Asignación Inicial ← Definición de orden de entrada a los pedidos a la programación (Random, máquina 1 como principal, ...)

Begin

Hallar el LPT total ← *lpt* * *Lotes*
Ordenar los trabajos de acuerdo con EDD
If existe empate:
 Entonces desempatar con LPT
 If persiste empate:
 Entonces desempatar de forma aleatoria
Crear lista de trabajos ordenados
Crear Diagrama de Gantt:
For Job in trabajos ordenados:
 Agregar el Job al diagrama de Gantt con su respectivo lpt por cada máquina
For jon in Diagrama de Gantt:
 If Job <= EDD:
 Job cumple los parámetros
End for
End for

2.6 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo que aparece en la Figura 1 ilustra el orden lógico en la secuencia de actividades realizadas en el algoritmo, desarrollado con el objetivo de proporcionar una herramienta que brinde mejor comprensión.

3. RESULTADOS

El ejercicio propuesto proviene de un ejercicio planteado en la clase de Producción III en la facultad de Ciencias Empresariales de la Universidad Tecnológica de Pereira [12]. En la Tabla 1 se presenta el número de trabajos que serán realizados, su fecha de entrega y los lotes que deben ser fabricados para cada uno.

Tabla 1. Características de los trabajos.

Parte	Fecha de entrega	Lote
0	4	10
1	1	10
2	2	4
3	0	5
4	1	10
5	1	25
6	2	5
7	3	5
8	2	2
9	4	4

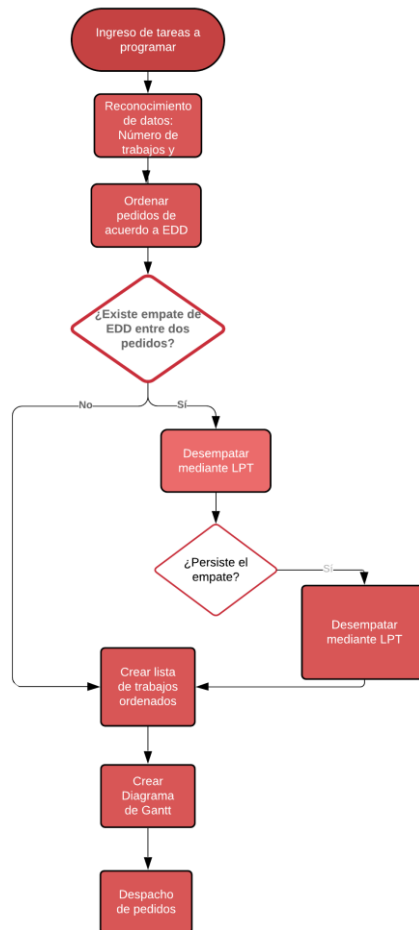


Figura 1. Diagrama de flujo

En la Tabla 2 se presentan los tiempos de procesamiento que tarda cada trabajo en cada máquina.

Tabla 2. Tiempos de procesamiento

Parte	Máquinas				
	A	B	C	D	E
0	3	2	2	4	1
1	1	2	3	2	6
2	3	2	1	2	3
3	1	3	1	2	2
4	1	0	4	1	5
5	1	2	3	1	1
6	2	4	2	3	1
7	5	2	4	1	3
8	1	2	1	5	4
9	3	4	5	1	2

Por cuestiones de practicidad, en la siguiente tabla se presenta el orden de secuenciación de uno de los 5 métodos escogidos, en este caso, el método random. En la tabla 3 se presenta el orden por el cual deben pasar cada pedido por cada máquina.

Tabla 3. Orden de secuenciación

Tipo de parte	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 5
0	1	2	3	4	5
1	2	1	3	4	5
2	3	4	1	5	2
3	2	3	5	4	1
4	2	1	4	5	3
5	4	1	5	2	3
6	5	1	2	3	4
7	3	1	4	2	5
8	2	1	3	5	4
9	5	4	3	2	1

Al aplicar el algoritmo para el escenario, se consiguieron los siguientes resultados:

1. Programa de secuenciación del primer escenario (Figura 2) donde la máquina 1 es la principal y es programada de primera.

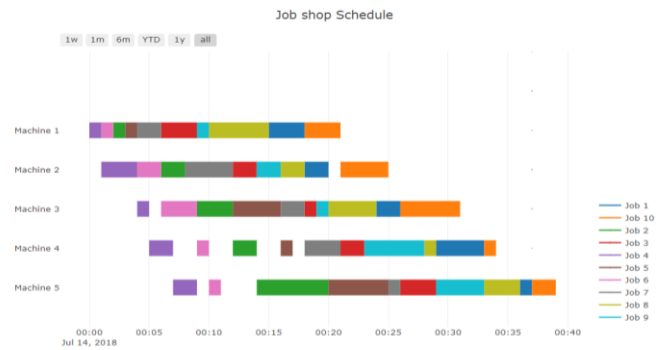


Figura 2. Primer escenario

2. Programa de secuenciación del segundo escenario (Figura 3) donde la máquina 2 toma el lugar de la máquina 1, pasa a ser la principal y es programada de primera.

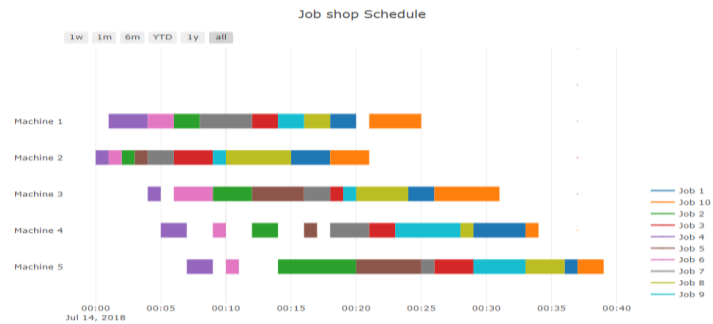


Figura 3. Segundo escenario

3. Programa de secuenciación del tercer escenario (Figura 4) donde la máquina 3 toma el lugar de la máquina 1, pasa a ser la principal y es programada de primera.

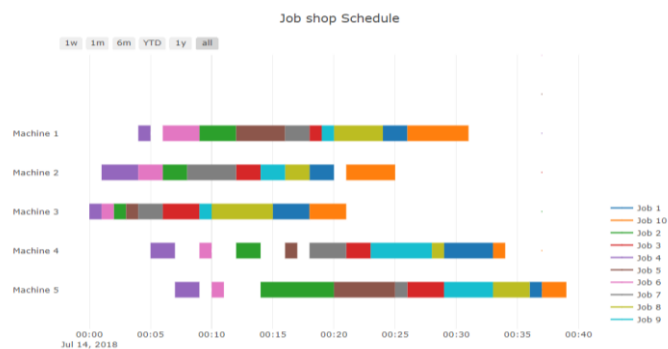


Figura 4. Tercer escenario

4. Programa de secuenciación del cuarto escenario (Figura 5) donde la máquina 4 toma el lugar de la máquina 1, pasa a ser la principal y es programada de primera.

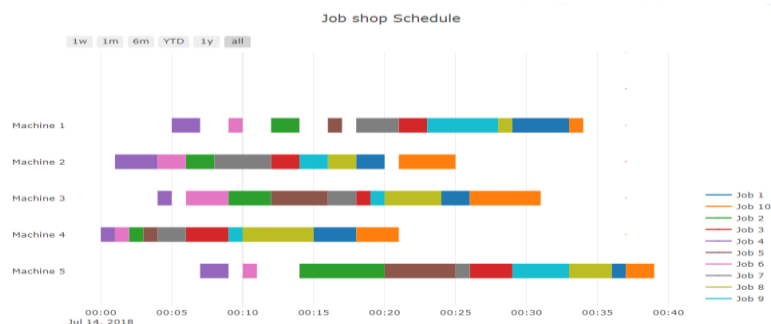


Figura 5. Cuarto escenario

5. Programa de secuenciación del quinto escenario (Figura 6) donde las máquinas son programadas de manera aleatoria o random.

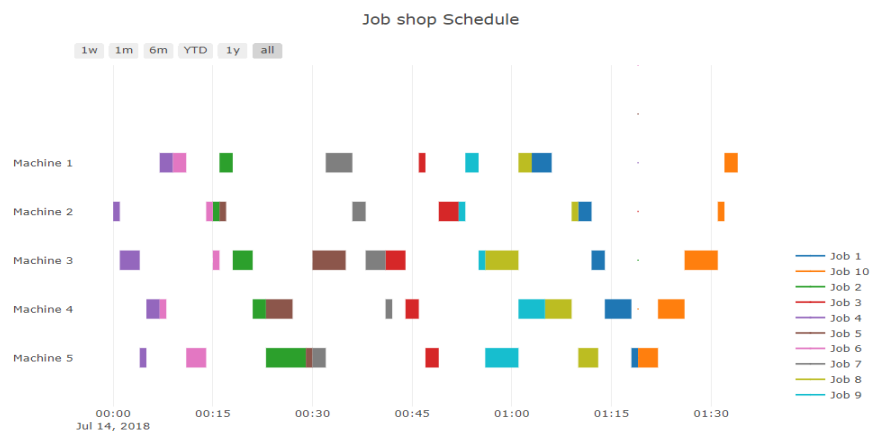


Figura 6. Quinto escenario

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Idle time

El tiempo improductivo evidenciado a lo largo de los 5 escenarios cambia drásticamente de uno a otro, esto significa el alto impacto que una pequeña decisión en el cómo programar los trabajos a lo largo de la secuenciación puede impactar la producción. La compañía que no programa eficientemente los turnos de trabajo o el flujo de operaciones puede sufrir grandes pérdidas a causa del gran tiempo de inactividad resultante de errores por parte de los empleados o las máquinas, ya sean causados por la administración o como resultado de factores fuera de su control.

4.2 Makespan

El tiempo total de la programación, es decir, cuando todos los trabajos han terminado de procesarse, se evidencia casi constante a excepción del escenario random, este hecho evidencia las similitudes de resultados de secuenciación cuando las reglas de despacho son usadas en procesos estandarizados que, generalmente, reducen el tiempo de programación a lo largo de la producción.

4.3 Principios del FMS

Las piezas pueden ser producidas en forma aleatoria, hecho que proporciona flexibilidad a un amplio rango de componentes y tamaños de series, reduciendo la mano de obra directa, debido a la reducción de ajustes y soportes de las tareas manuales de manipulación de materiales y a la automatización del control de las máquinas. Al realizarse las operaciones sin intervención humana se incrementa la utilización de las máquinas, se reducen los costos de fabricación, se reducen inventarios de trabajos en proceso, dado que los materiales se desplazan directamente de máquina a máquina y se obtienen ahorros respecto a los sistemas convencionales. Así como la reducción de tiempo de respuesta, calidad consistente, mejoras en el control del trabajo y mejor la estimación de tiempo de proceso.

5. CONCLUSIONES

Debido a que ninguna empresa funciona al máximo de su eficiencia durante largos períodos de tiempo por factores controlables o incontrolables, minimizar el tiempo de inactividad y el tiempo de procesamiento total es necesario en función para que la empresa pueda considerarse competitiva en el mercado.

El objetivo de minimizar este costo para la empresa a través de una programación y coordinación cuidadosas con los grupos conectados puede ser alcanzado de muchas formas y la solución planteada a partir de la combinación de reglas de despacho junto con los principios de los sistemas de manufactura flexible es una de ellas.

La elaboración de planes de contingencia para mantener las operaciones en ejecución cuando surge un evento inesperado es extremadamente importante en cualquier ambiente de producción, así como el desarrollo de nuevas innovaciones en el área de secuenciación.

Propuestas nuevas como la involucración de otras políticas de despacho, un sistema de *batching* (políticas de loteo) y pedidos con más particularidades son una necesidad para un tipo de secuenciación necesario por las compañías que cada vez se acerque más a los principios de los sistemas de manufactura flexible.

REFERENCIAS

- [1] Hinojosa, Ángel Pablo (2019). PYTHON Paso a paso. Ediciones de la U. Primera Edición.
- [2] Cuatrecasas, Luis. Diseño Avanzado de Procesos Y Plantas de Producción Flexible. Técnicas de Diseño y Herramientas Graficas con soporte informático. Editorial Profit. Primera Edición. Barcelona España, pp-10 -18.
- [3] Liu, J., & MacCarthy, B. L. (1996). The classification of FMS scheduling problems. *International journal of production research*, 34(3), 647-656.
- [4] Pinedo (2010) LEKIN® – Flexible Job-Shop Scheduling System. The Academic version of LEKIN® is available for download.
- [5] Baker, K. R. (1974). Introduction to sequencing and scheduling. John Wiley & Sons.
- [6] Pinedo, M. (1995), Scheduling: Theory, Algorithms and System, Prentice-Hall.
- [7] Epstein, L., & Sgall, J. (1999, July). Approximation schemes for scheduling on uniformly related and identical parallel machines. In European Symposium on Algorithms (pp. 151-162). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [8] Johnson, D. S., & Garey, M. R. (1979). Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. WH Freeman.
- [9] Vaithianathan, R., & McRoberts, K. L. (1982). On scheduling in a GT environment. *Journal of Manufacturing Systems*, 1(2), 149-155.
- [10] Walker, T. C., Miller, R. K., & Sheets, K. Y. (1986). Expert systems 1986: an assessment of technology and applications. *IEEE Expert*, 1(4), 88-89.
- [11] Medina, P. D., Cruz, E. A., & Restrepo, J. H. (2009). Problema de formación de lotes de fabricación en un sistema de manufactura flexible: Heurística de selección de partes. *El Hombre y la Máquina*, (32), 68.
- [12] Cock, German. Asignatura producción 3. Sistemas de Manufactura Flexible. Apuntes de clase. Facultad de Ciencias Empresariales. Universidad Tecnológica de Pereira UTP. Primer Semestre 2018.

Desarrollo de una herramienta computacional para el análisis de deformación debida a una carga perpendicular en estructuras tipo sándwich fabricadas en material compuesto

Daniel Agudelo¹

Jorge E. Gaitán A.²

Daniela Sacristán M.³

Universidad de San Buenaventura – Colombia

Este capítulo presenta el desarrollo y validación de la herramienta computacional Aplicación para la Resolución de Casos de Deformación en el Uso de Materiales Compuestos (ARCUM), la cual fue diseñada a partir de un proyecto de investigación desarrollado en la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, con el propósito de determinar el comportamiento de una estructura plana fabricada en materiales compuestos sometida a una carga normal puntual o distribuida. La investigación parte de modelos matemáticos existentes referentes al diseño y cálculo de propiedades mecánicas de láminas, laminados y estructuras tipo sándwich y del modelo analítico de diferencias finitas. Esta validación es expuesta en el presente documento en dos partes: la primera describirá la obtención y comparación de resultados de las propiedades mecánicas del material diseñado con respecto a la bibliografía y la segunda muestra la comparación de los valores de deformación y esfuerzo máximos obtenidos por el método de diferencias finitas utilizado por ARCUM, con respecto a los obtenidos por el programa especializado en análisis estructural ANSYS. Los resultados obtenidos demuestran la validez de la herramienta computacional desarrollada.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de los materiales compuestos como solución a los problemas de baja resistencia a cargas, alto peso estructural o la fabricación de partes de formas complejas, ha ido incrementando abruptamente a lo largo de los años [1]. Las técnicas de manufactura utilizando este tipo de materiales permite el desarrollo de nuevas configuraciones y combinaciones que permiten obtener propiedades que suplan las necesidades de un sin número de industrias. Por tal motivo, diferentes sectores de la industria de la fabricación de partes y componentes han implementado en sus procesos el uso de materiales compuestos de matriz polimérica en las áreas de la ingeniería civil, aeroespacial y marítima [2], [3], [4]. La implementación de este tipo de materiales en estructuras primarias en la industria aeroespacial requiere de la certificación de los componentes ante las instituciones reguladoras correspondientes. Debido a esto, los departamentos de análisis y de diseño estructural en las industrias han dedicado estudios para determinar adecuadamente el comportamiento de estos compuestos sujetos a cargas externas.

Para predecir las características mecánicas se encuentran dos métodos: a través de experimentación o a través de simulaciones computacionales, para este último se considerará complementar su análisis con desarrollos analíticos [5] - [7]. La segunda alternativa es más viable en las etapas de diseño conceptual y desarrollo de prototipos debido a los menores costos que conlleva [8] - [10]. Dada la importancia de la configuración estructural tipo sándwich y con base en los estudios realizados previamente a nivel nacional e internacional, dirigidos al estudio de los modelos físicos que predicen el comportamiento de estructuras bajo cargas de pandeo, se decidió desarrollar un estudio referente al desarrollo de una herramienta computacional que soporte los procesos de diseño conceptual de componentes estructurales con esta configuración [11] - [15]. La herramienta presentada implementa principios de diferencias finitas al análisis de pandeo en placas y vigas con el fin de apoyar a ingenieros e investigadores en el desarrollo de proyectos [16] - [19]. La complejidad de los modelos analíticos motivó la creación de esta metodología, validada a través de casos de estudio, con el fin de corroborar la precisión de los resultados. El presente trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera. Primero se describe la base matemática utilizada para el diseño de una estructura tipo sándwich. Posteriormente, se explica el desarrollo del modelo de la placa y la aplicación del método de diferencias finitas para el cálculo de esfuerzo y deformación máximos bajo la presencia de cargas perpendiculares utilizando ARCUM. Adicionalmente, se presentan los resultados de la simulación del mismo caso en ANSYS con el fin de contrastar los valores. Por último, ésta validación es complementada por la comparación de diversos casos de estudios, entre ellos una investigación desarrollada en la Universidad Carlos III de Madrid [20].

2. MÉTODO

2.1 Planteamiento del caso

Para llevar a cabo el estudio de deformación por pandeo de una placa de material compuesto hay que tener en cuenta sus características físicas que afectan directamente sus propiedades mecánicas y el esfuerzo y deformación máximos que podrá soportar. Por ello, el caso a evaluar consiste en una estructura tipo sándwich mostrada en la Figura 1 apoyada (con soportes fijos) en sus bordes y constituida por un núcleo de espuma de poliuretano (Core material) y una piel simétrica compuesta por un laminado (*Layer*), formado a partir de láminas de fibra bidireccional de Kevlar y resina epóxica²¹.

¹ dagudelo@usbog.edu.co

² jgaitan@usbog.edu.co

³ danielasacristan6@gmail.com

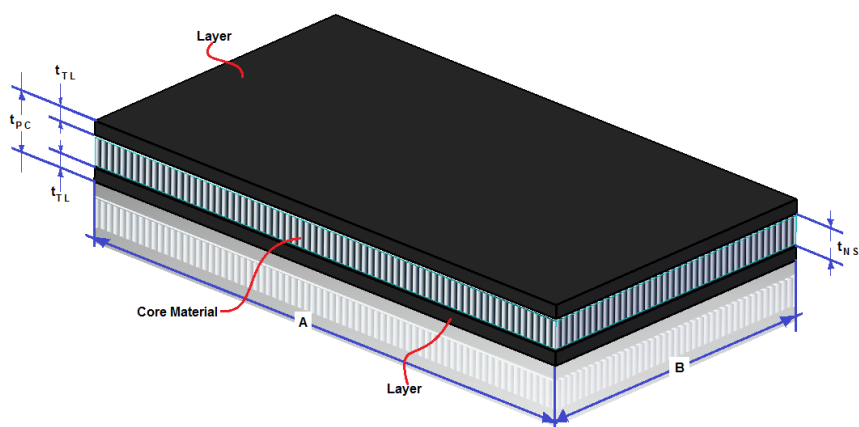


Figura 1. Nomenclatura de una estructura tipo sándwich

2.2 Diseño de la estructura en material compuesto

2.2.1 Lámina

El diseño de la lámina utilizado para este estudio partió de dos tipos de análisis: el análisis micromecánico y el análisis macromecánico [3], [6]. El primer análisis es realizado partiendo de la selección de materiales tanto del refuerzo (fibra) como de la matriz (resina) y la fracción volumétrica para realizar el cálculo de las propiedades mecánicas de la lámina. El segundo análisis se desarrolla para determinar las mismas propiedades a un ángulo de orientación específico del material de refuerzo. Dado que los tejidos planos de fibras de carbono, Kevlar o vidrio son realizados por la intersección perpendicular de fibras unidireccionales, es posible aproximar su comportamiento en el plano $x - y$, a partir de la superposición de las fibras a 0° y 90° [21]. Para ello debió ser aplicada la regla de las mezclas con el fin de determinar los módulos de elasticidad longitudinal y transversal, la relación de Poisson y el módulo cortante de una lámina con fibras unidireccionales a 0° , para que luego sean corregidas por el factor de relación entre las fibras a 0° y 90° . En la Tabla 1 se describen las propiedades mecánicas de diferentes materiales de refuerzo y matriz.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de fibras y matrices para el diseño de una lámina [17]

Material	Módulo longitudinal [MPa]	Relación de Poisson	Gravedad específica	Esfuerzo último [MPa]
Refuerzo	Vidrio	71000	0,22	3500
	Carbono	230000	0,3	3200
	Kevlar	70300	0,35	3600
Matriz	Epóxica	4500	0,4	130
	Poliéster	2900	0,38	80
	Poliamida	4000	0,35	70

Esta regla parte de la selección de las propiedades mecánicas de la fibra y la matriz y de los valores asignados para la fracción volumétrica de la fibra y el espesor de la lámina dados por la Tabla 1, para posteriormente calcular la fracción volumétrica de la matriz V_m y las densidades de la fibra y la matriz, ρ_f y ρ_m respectivamente, por medio de las ecuaciones (1) y (2).

$$V_m = 1 - V_f \quad (1)$$

$$\rho_f = \rho_{rf} * 1000 ; \rho_m = \rho_{rm} * 1000 \quad (2)$$

Por medio de la ecuación (3) es posible calcular la densidad de la lámina ρ_L , en función de las fracciones volumétricas definidas anteriormente. Para determinar las fracciones máxicas de la fibra y la matriz, M_f y M_m respectivamente, de acuerdo con la ecuación (4).

$$\rho_L = (\rho_f V_f) + (\rho_m V_m) \quad (3)$$

$$M_f = \frac{\rho_f}{\rho_L} V_f ; M_m = \frac{\rho_m}{\rho_L} V_m \quad (4)$$

Posteriormente, se realiza el cálculo de las propiedades mecánicas de la lámina, partiendo de la ecuación (5), en las cuales se obtienen los valores de los módulos de Young longitudinal E_{1L} y transversal E_{2L} , dependientes de la fracción volumétrica y de las propiedades de los materiales constituyentes de la lámina. Adicionalmente, se determina la relación de Poisson longitudinal ν_{12L} , cuya relación con la fracción volumétrica de la fibra y la resina se encuentra descrita por la ecuación (6).

$$E_{1L} = (E_{1f} * V_f) + (E_{1m} * V_m) \quad E_{2L} = E_{1m} \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_{1m}}{E_{1f}} V_f} \right] \quad (5)$$

$$v_{12L} = v_{12f} V_f + v_{12m} V_m \quad (6)$$

Una vez se determina la relación de Poisson longitudinal, se calcula el módulo cortante de la lámina, G_{12f} y G_{12m} respectivamente, en función de sus correspondientes módulos de Young longitudinales y sus relaciones de Poisson, como se muestran en la ecuación (7) y partiendo de dichos valores, se encuentra el módulo cortante de la lámina G_{12L} por medio de la ecuación (8).

$$G_{12f} = \frac{E_{1f}}{2(1 + v_{12f})} ; G_{12m} = \frac{E_{1m}}{2(1 + v_{12m})} \quad (7)$$

$$G_{12L} = G_{12m} \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_{12m}}{G_{12f}} V_f} \right] \quad (8)$$

Cabe resaltar que de la ecuación (1) a la (8) se plantea la predicción del comportamiento de una lámina unidireccional, por lo que es necesario recalculer dichas propiedades teniendo en cuenta que, el tipo de tejido tenido en cuenta por ARCUM es netamente bidireccional. Este proceso de cálculo del modelo micromecánico para los tejidos planos se encuentra definido por un factor k que, como se observa en la ecuación (9), relaciona la cantidad de hilos por metro en la dirección horizontal, con respecto a la vertical, al encontrarse entrelazados y orientados de manera perpendicular. Para este caso k equivale a 0,5 al poseer la misma cantidad de hilos en ambas direcciones [21].

$$k = \frac{\# \text{ Hilos en la dirección horizontal}}{\# \text{ Hilos en la dirección horizontal} + \# \text{ Hilos en la dirección vertical}} = 0,5 \quad (9)$$

Teniendo en cuenta la anterior apreciación, es posible computar el módulo de Young longitudinal, que a su vez será igual al transversal, a partir de los mismos conceptos ya calculados para una lámina unidireccional como se muestra en la ecuación (10). Con las modificaciones proporcionadas por el factor k , se computa también la relación de Poisson.

$$E_{1L} = E_{2L} = (k E_{1L}) + ((1 - k)E_{2L}) ; v_{12L} = v_{21L} = \frac{v_{12L}}{\left(k + \left((1 - k) \frac{E_{1L}}{E_{2L}} \right) \right)} \quad (10)$$

Por otro lado, el análisis macromecánico de la lámina parte de los resultados de la sección anterior, implementando la forma generalizada de la ley de Hooke para una lámina cuyas fibras se encuentran orientadas un ángulo θ del eje longitudinal [3]. En primer lugar, se deben tener en cuenta los términos de la matriz de transformación con la que predice el comportamiento en un ángulo a partir de cosenos directores, como se observa en la ecuación (11).

$$s = \text{sen}(\theta) ; c = \text{cos}(\theta) \quad (11)$$

Considerando las relaciones anteriores, se plantea el grupo de ecuaciones (12), que definen el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el módulo cortante como funciones dependientes de las propiedades de la lámina sin orientación alguna, finalizando la fase de diseño de la lámina.

$$E_{xx} = \frac{1}{\frac{1}{E_{1L}} c^4 + \left(\frac{1}{G_{12L}} - \frac{2 v_{12L}}{E_{1L}} \right) s^2 c^2 + \frac{1}{E_{2L}} s^4}$$

$$v_{xy} = E_{xx} \left[\frac{v_{12L}}{E_{1L}} (s^4 + c^4) - \left(\frac{1}{E_{1L}} + \frac{1}{E_{2L}} - \frac{1}{G_{12L}} \right) s^2 c^2 \right] \quad (12)$$

$$G_{xy} = \frac{1}{2 \left(\frac{2}{E_{1L}} + \frac{2}{E_{2L}} + \frac{4 v_{12L}}{E_{1L}} + \frac{1}{G_{12L}} \right) s^2 c^2 + \frac{1}{G_{12L}} (s^4 + c^4)}$$

2.2.2 Laminado

Teniendo en cuenta el diseño de lámina presentado previamente, el diseño del laminado parte del número de láminas apiladas y el ángulo de orientación de cada una de ellas, para este caso se estableció que el número de láminas sería

igual a 10 y el código del laminado se estableció como [90, 60, 45, 30, 0]_x. Por medio de la ecuación (13), se calcula el espesor total del laminado t_{TL} , donde $t_{1/2}$ es el espesor desde el plano medio y t_L el espesor de cada lámina, como se observa en la Figura 2. Se destaca que el código de orientaciones para este estudio es simétrico, por lo que, para determinar la distancia de cada capa desde el plano medio, se consideran espesores positivos para las láminas que se encuentren por encima y negativos para los que se encuentren por debajo de éste. Para ello se recurre a la diferencia planteada en la ecuación (14), evaluada para cada número de lámina y ordenada de menor a mayor para obtener el vector de espesores.

$$t_{TL} = t_L N_{TL}; t_{1/2} = \frac{t_{TL}}{2} \quad (13)$$

$$t_a = t_{1/2} - t_{TL} |_1^{N_{TL}} \quad (14)$$

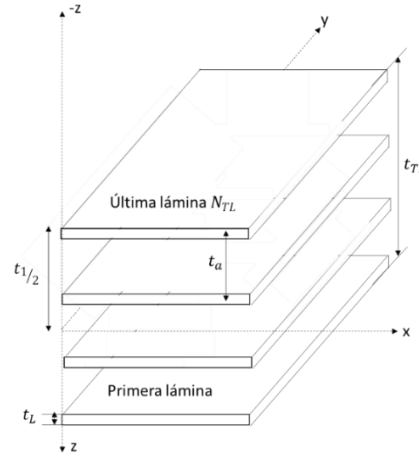


Figura 14. Características de laminado fabricado en materiales compuestos

Por otro lado, la ecuación (15) plantea la creación de la matriz de conformidad S_{ij} de una lámina a partir de sus propiedades mecánicas. Dicha matriz describe las relaciones de esfuerzo-deformación de determinado material en dos dimensiones y, además, su inversa equivale a la matriz de rigidez reducida Q_{ij} , la cual es necesaria para determinar el valor de las propiedades mecánicas del laminado final [6], es decir los módulos de Young longitudinal y transversal, el módulo cortante y la relación de Poisson [3].

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{1L}} & \frac{-\nu_{12L}}{E_{1L}} & 0 \\ -\frac{\nu_{12L}}{E_{1L}} & \frac{1}{E_{2L}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12L} \end{bmatrix}; Q_{ij} = [S]^{-1} \quad (15)$$

Después de crear la matriz Q_{ij} , se determina el valor de las propiedades mecánicas para cada lámina en función del ángulo de orientación definido por el usuario, a partir del sistema de ecuaciones (12); para constituir la matriz \overline{Q}_{ij} a partir de coeficientes que dependen de la matriz Q_{ij} y la matriz de transformación en función del ángulo de orientación de las fibras: c y s , de manera que, como lo expone el conjunto de ecuaciones (16) la creación de esta matriz debe realizarse para cada una de las capas que componen el laminado de acuerdo con el ángulo respectivo ingresado.

$$\overline{Q}_{ij} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \overline{Q}_{11} &= Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \\ \overline{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^2) \\ \overline{Q}_{22} &= Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \\ \overline{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \\ \overline{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})cs^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s \\ \overline{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(c^4 + s^2) \end{aligned} \quad (16)$$

Posteriormente, y como lo muestra la ecuación (17), se conforma la matriz de rigidez plana, la cual relaciona las fuerzas resultantes presentes en el plano y las deformaciones en el mismo y, en función de dicha matriz, se definen las propiedades mecánicas del laminado, obteniendo las constantes de ingeniería.

$$A_{ij} = \sum_{a=1}^{N_{TL}} [\overline{Q}_{ij}]_a (t_a - t_{a-1}) \quad (17)$$

La expresión anterior refleja el proceso repetitivo de la multiplicación de la matriz \overline{Q}_{ij} de cada lámina a determinado ángulo, por la deferencia entre el espesor de la lámina "a", que es la i-ésima lámina, y la lámina inmediatamente anterior "a-1"; siendo "a" la variable que cambia en orden ascendente desde la primera lámina hasta el número máximo de capas ingresadas por el usuario. Finalmente, los módulos de Young longitudinal y transversal, la relación mayor de Poisson y el módulo cortante, son hallados a partir del conjunto de ecuaciones (18), relacionando los coeficientes de la inversa de la matriz A^*_{ij} y el espesor total del laminado. En las expresiones la variable t hace referencia al espesor de las láminas que se encuentren incluidas en el proceso cíclico.

$$E_{1La} = \frac{1}{t_{TL} A^*_{11}} ; E_{2La} = \frac{1}{t_{TL} A^*_{22}} ; \nu_{12La} = -\frac{A^*_{12}}{A^*_{11}} ; G_{12La} = \frac{1}{A^*_{66}} \quad (18)$$

2.2.3 Estructura tipo sándwich

Las propiedades de las pieles de una estructura tipo sándwich pueden ser asumidas como las del compuesto en general, siempre y cuando el espesor del núcleo sea significativamente mayor al de cada piel y su densidad sea como mínimo un orden de magnitud menor al del material de éstas [22] como lo muestra la ecuación (19). Teniendo en cuenta que el laminado previamente diseñado equivale a dichas pieles superior e inferior, los factores característicos de esta configuración se centran en el espesor final de la placa t_{PC} , dado por la ecuación (20) y los coeficientes utilizados durante la aplicación del método de diferencias finitas (ver sección siguiente) se presentan a continuación. Adicionalmente, se calcula la rigidez a la flexión de la placa a partir del espesor total t_{PC} en la ecuación (21).

$$E_{1N} \ll E_{1La} ; \frac{E_{1N}}{E_{1La}} > 10^{-1} \quad (19)$$

$$t_{PC} = t_{TL} + t_{NS} \quad (20)$$

$$\frac{E_{1La} t_{PC}^4}{2(1 - \nu_{12La} \nu_{21La})} \quad (21)$$

2.3 Modelado de la placa

La estructura analizada tiene 20 cm de ancho (A) y 40 cm de largo (B). Sobre la misma se aplicó una carga distribuida de 1000 Pascales. El proceso de determinación de la deformación de la placa, así como de sus características estructurales, se encontró a partir de un modelo de diferencias finitas aplicado a estructuras. Esta forma de solución requiere que el dominio de análisis, en este caso la placa plana, tenga un enmallado para poder resolver dicho modelo matemático en cada nodo que compone la malla. La malla tiene 9 divisiones laterales, entregando así un total de 81 nodos, como se muestra en la Figura 3. El método de diferencias finitas es dependiente del número de nodos, y éste a su vez, dependiente del número de divisiones laterales que sean definidas, por tal motivo, son determinados los espaciamientos horizontales y verticales, que definen el tamaño de cada uno de los elementos Δx y Δy respectivamente, a partir de la ecuación (22).

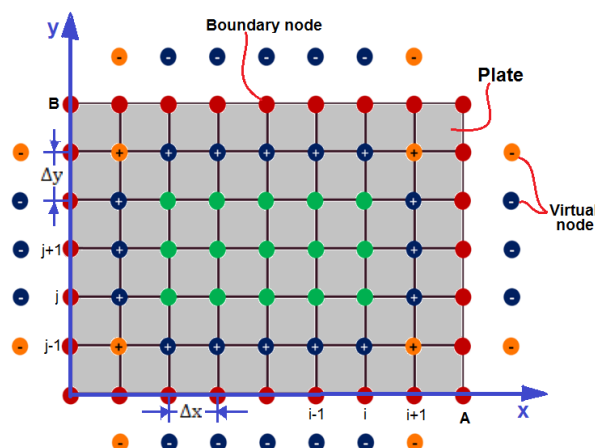


Figura 3. Condiciones de los nodos de acuerdo con su posición en la placa

$$\Delta x = \frac{A}{b}; \Delta y = \frac{B}{b} \quad (22)$$

2.3.1 Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas permite la resolución de ecuaciones diferenciales por medio de aproximaciones numéricas definidas por un enmallado finito. Este método es utilizado para resolver la ecuación de equilibrio (23), que relaciona la rigidez con la flexión D , la carga aplicada P y la deflexión W de una placa rectangular de acuerdo con la teoría de placas [23].

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \quad (23)$$

Esta expresión es traducida a términos algebraicos por medio de series de Taylor al esquema mostrado en la Figura 4 [24], la cual es utilizada para obtener la expresión generalizada de cada nodo a partir de la relación de aspecto α (ecuación (24)) de uno de los elementos de la malla y conformar el sistema de ecuaciones; teniendo en cuenta que i y j equivalen a la posición del nodo en el eje x y y respectivamente (Figura 3).

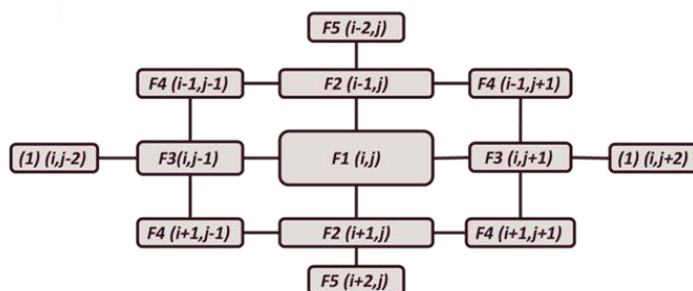


Figura 4. Estructura para la evaluación de coeficientes en cada nodo de la malla

Por medio del conjunto de ecuaciones (24) y la Figura 4, los coeficientes $F1, F2, F3, F4$ y $F5$ son calculados para definir las variables de la matriz de deformación denominada W_{ij} .

$$\alpha = \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2}$$

$$F1 = 6 + 8\alpha + 6\alpha^2; F2 = 4\alpha(\alpha + 1) \quad (24)$$

$$F3 = 4(\alpha + 1); F4 = 2\alpha; F5 = \alpha^2$$

2.3.2 Condiciones de frontera

La placa se encuentra soportada en sus 4 bordes y la disposición de los nodos es como la mostrada en figura 3, el tamaño real de la placa se encuentra simbolizado y delimitado por los nodos de color rojo denominados bordes externos, los cuales al estar empotrados no poseen desplazamiento transversales ni rotacionales, es decir $W_{i,j} = 0$. Adicionalmente, los nodos fuera del contorno de la malla, denominados nodos ficticios o virtuales, deben ser incluidos en los cálculos para resolver el modelo, con el fin de mantener la continuidad de las ecuaciones, dichos nodos virtuales se les considera o se supone una deformación, la cual corresponde a la misma magnitud pero en sentido contrario que los nodos cercanos a la frontera pero que son parte de la placa ($W_{i,j} = -W_{i-1,j}$), es decir los nodos virtuales son considerados para este estudio como un reflejo negativo respecto a la frontera lateral de la placa [25].

Al obtener una aproximación de la ecuación (23) a partir de la serie de Taylor, se tiene la ecuación (25), la cual se relaciona al esquema de la Figura 3 [26]. Esta ecuación puede ser aplicada de manera directa a los nodos que no tienen cercanía de dos espacios (dos nodos) con los nodos periféricos de la placa (Figura 3, nodos en color verde), estos nodos son denominados nodos internos; sin embargo, debe ser modificada para las posiciones de los bordes y esquinas internas, identificados por el color azul y naranja con signo positivo, de acuerdo con la Tabla 2.

$$F1 W_{(i,j)} - F2(W_{i-1,j} + W_{i+1,j}) - F3(W_{i,j+1} + W_{i,j-1}) + F4(W_{i-1,j+1} + W_{i+1,j+1} + W_{i+1,j-1} + W_{i-1,j-1}) + F5(W_{i-2,j} + W_{i+2,j}) + W_{i,j-2} + W_{i,j+1} = F_{i,j} \quad (25)$$

Esta condición de frontera adicionalmente tiene como consecuencia los momentos flectores M_x, M_y y M_{xy} , que se encuentran descritos por el conjunto de ecuaciones (28). Estos esfuerzos se generan en los bordes fijos al ser aplicada la carga, afectando directamente los esfuerzos a los que se encontrará sometida la placa. Estos momentos flectores alcanzan su magnitud máxima al evaluarse en el punto crítico de la placa, por lo que son determinados para el nodo en el que se presenta la mayor deflexión.

Tabla 2. Consideraciones de frontera - modificaciones de la ecuación general aplicando diferencias finitas de acuerdo con la posición del nodo

Localización	Modificación	Ecuaciones	
Esquinas internas	Superior izquierda	$W'_{i-2,j} = W_{i,j-2} = -W_{i,j}$	(26)
	Superior derecha	$W'_{i-2,j} = W_{i,j+2} = -W_{i,j}$	
	Inferior izquierda	$W'_{i+2,j} = W_{i,j-2} = -W_{i,j}$	
	Inferior derecha	$W'_{i+2,j} = W_{i,j+2} = -W_{i,j}$	
Bordes internos	Superior	$W_{i-2,j} = -W_{i,j}$	(27)
	Inferior	$W_{i+2,j} = -W_{i,j}$	
	Izquierdo	$W_{i,j-2} = -W_{i,j}$	
	Derecho	$W_{i,j+2} = -W_{i,j}$	

$$\begin{aligned}
 M_x &= -D \left[\frac{W_{(i,j+1)} - (2 W_{(i,j)}) + W_{(i,j-1)}}{\Delta x^2} + \nu_{12} \frac{W_{(i+1,j)} - (2 W_{(i,j)}) + W_{(i-1,j)}}{\Delta y^2} \right] \\
 M_y &= -D \left[\nu_{12} \frac{W_{(i,j+1)} - (2 W_{(i,j)}) + W_{(i,j-1)}}{\Delta x^2} + \frac{W_{(i+1,j)} - (2 W_{(i,j)}) + W_{(i-1,j)}}{\Delta y^2} \right] \\
 M_{xy} &= \frac{D(1 - \nu_{12})}{4\Delta x \Delta y} [W_{(i+1,j+1)} + W_{(i-1,j+1)} + W_{(i+1,j-1)} + W_{(i-1,j-1)}]
 \end{aligned} \tag{28}$$

Finalmente es posible calcular el esfuerzo máximo en el punto de máxima deformación, a través de la ecuación (29) [27].

$$M_{\max} = \frac{1}{2} (M_x + M_y) + \sqrt{\left[\frac{1}{2} (M_x - M_y) \right]^2 + M_{xy}^2}; \quad \sigma_{\max} = \frac{6M_{\max}}{t_{cp}^2} \tag{29}$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se describirán los resultados de las pruebas comparativas realizadas en ARCUM respecto a las pruebas desarrolladas en las referencias bibliográficas consultadas y a las simulaciones llevadas a cabo en ANSYS, con el fin de determinar la exactitud de los resultados que influyen directamente en la deformación de una placa de material compuesto, es decir el cálculo de sus propiedades y la correspondiente solución a través del método iterativo propuesto. En primer lugar, se demostrará la capacidad de la herramienta para calcular las propiedades mecánicas tanto de una lámina como de un laminado. Seguidamente, se expondrá la evaluación de los distintos casos de carga aplicada que puedan ejecutarse en la placa, ya sea puntual, distribuida sobre toda la placa o parcialmente distribuida; realizando a su vez el mismo análisis en el software ANSYS y calculando el porcentaje de error entre los resultados obtenidos. Finalmente, se presentará la comparación realizada entre ARCUM y la investigación desarrollada en la Universidad Carlos III de Madrid [20].

3.1 Cálculo de propiedades mecánicas de láminas y laminados

Teniendo en cuenta los modelos analíticos usados por la aplicación ARCUM, se ejecutó un análisis de las propiedades mecánicas de una lámina de fibra de Kevlar y resina epóxica, las cuales se muestran en el recuadro rojo de la Figura 5. Para este caso en específico se utilizó una fracción volumétrica del 50% entre el refuerzo y la matriz.

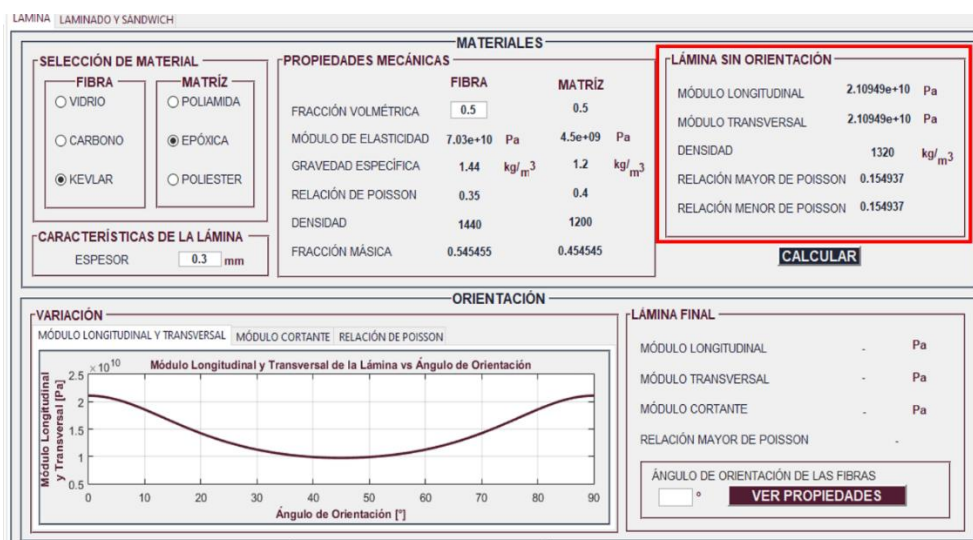


Figura 5. Diseño de lámina para aplicación de una carga puntual

A continuación, se compararon los resultados obtenidos con aquellos reportados en la bibliografía consultada en términos del módulo de elasticidad longitudinal y transversal, el módulo cortante y la relación de Poisson [21]. La magnitud del error entre los datos comparados es determinada por medio de la ecuación (30). Los resultados se presentan en la Tabla 3.

$$\text{Error} = \frac{V_{\text{Referencia}} - V_{\text{Calculado}}}{V_{\text{Referencia}}} \quad (30)$$

Tabla 3. Comparación de constantes elásticas del caso de carga puntual

Característica	Resultados de referencia	Resultados ARCUM	Error porcentual
Módulo de elasticidad [MPa]	2,20e+10	2,11e+10	4,1%
Módulo cortante [MPa]	4,00e+09	3,78e+09	5%
Relación de Poisson	0,15	0,154	3,3%

A partir de esta comparación se determinó un error de 4,1%, 5% y 3,3% para los módulos de elasticidad, cortante y relación de Poisson, respectivamente, evidenciando que el único valor por encima del real, fue el de esta última variable. Una vez comprobada la validez de las características mecánicas de la lámina, se realizó el diseño de un laminado de diez capas dispuestas según la configuración mostrada en la Figura 6, donde se resaltan en el recuadro rojo las propiedades mecánicas del compuesto y en el recuadro azul de la misma figura, el espesor total del laminado.

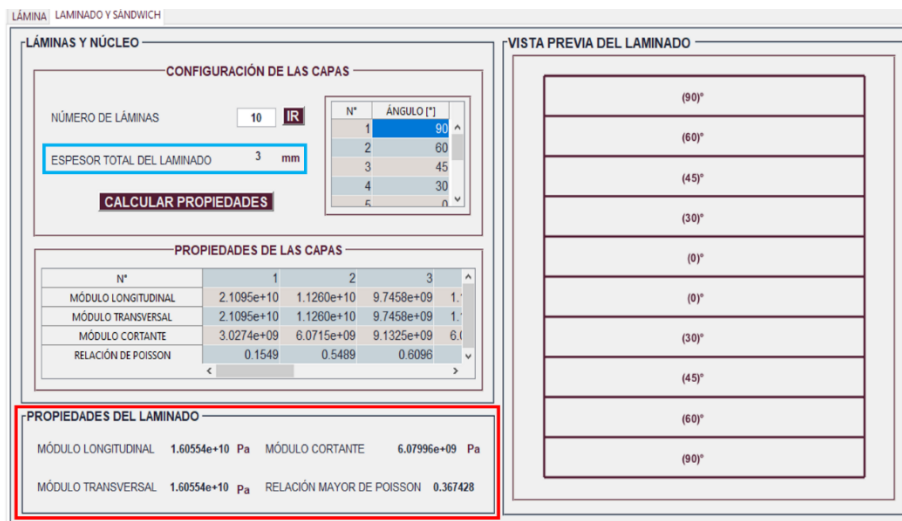


Figura 6. Diseño de laminado para aplicación de una carga puntual

3.2 Caso de carga puntual sobre la estructura

Para este caso se diseñó un laminado en fibra de vidrio y resina epóxica con una relación volumétrica del 50%, compuesto por cuatro capas de fibra en orientación simétrica [90, 45]_s. Las propiedades mecánicas son mostradas en la Figura 7, las cuales fueron utilizadas para el análisis estructural tanto en ARCUM como en ANSYS.

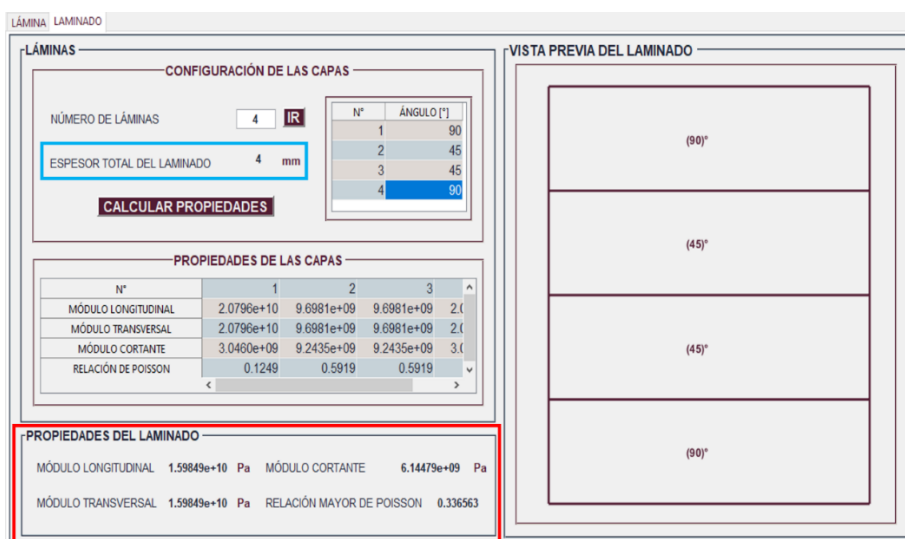


Figura 7. Propiedades mecánicas del laminado de fibra de vidrio y resina epóxica

Posteriormente, se definieron las dimensiones de ancho y largo de la placa, siendo estas 0,5 y 0,350 metros respectivamente, como se observa en el recuadro verde de la Figura 8, así como también es señalado en negro y en el recuadro amarillo, el nodo 61 de una malla gruesa como el punto de aplicación de la carga puntual P de 100 Newton.

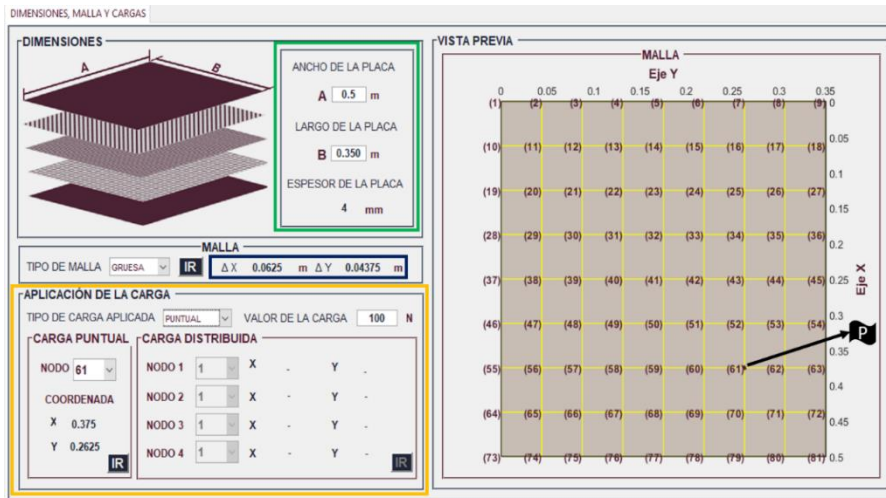


Figura 8. Magnitud y punto de aplicación de la carga puntual sobre el laminado

Este caso fue diseñado y ejecutado con el fin de garantizar el funcionamiento del código computacional aún sin existir simetría alguna en la aplicación de la carga puntual y de esta manera poder ilustrar el comportamiento de la solución obtenido por ARCUM bajo cualquier carga situada en cualquier punto de la superficie. El caso fue analizado en ARCUM y los resultados de la deformación máxima son presentados en la Figura 9. El mismo caso fue configurado en ANSYS y la deformación total es mostrada en la Figura 10. Los datos de deformación y esfuerzo normal máximo de la placa son mostrados en la Tabla 4, en donde el porcentaje de error entre ambas variables es aproximadamente igual, siendo este de 3,5 %. Ambos resultados de ARCUM se encuentran por encima de los arrojados por ANSYS.

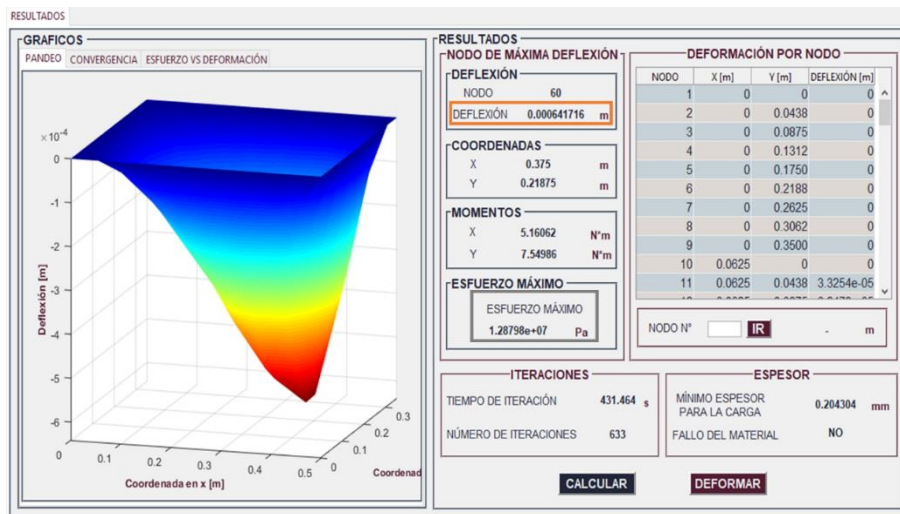


Figura 9. Resultados del caso de carga puntual en ARCUM

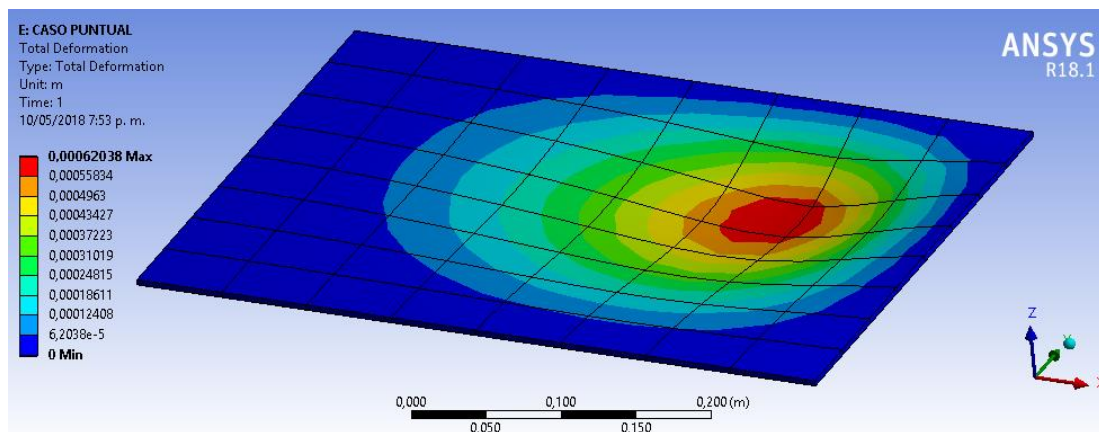


Figura 10. Resultados del caso de carga puntual en ANSYS

Tabla 4. Comparación de la magnitud del esfuerzo y deformación para el caso de carga puntual.

Característica	Resultados de referencia	Resultados ARCUM	Error porcentual
Esfuerzo [MPa]	1,236e+07	1,280e+07	3,57%
Deformación [m]	0,00062038	0,00064170	3,44%

3.3 Caso de carga distribuida sobre la estructura

Para la validación del caso de carga distribuida sobre la placa, se diseñó una placa tipo sándwich, cuya piel es laminado compuesto por 10 láminas de fibra de Kevlar y resina epóxica dispuestas en una configuración $[90, 60, 45, 30, 0]_s$ de espesor igual a 3 milímetros y su material de núcleo es espuma de poliuretano. Se definió adicionalmente una fracción volumétrica del 50%. Al ser mucho mayor el módulo elástico del material compuesto respecto al módulo elástico del material del núcleo, son las propiedades de los laminados las utilizadas para aproximar el comportamiento bajo la carga a la que sería sometida la placa, es decir, las ingresadas a ANSYS para determinar los valores de deformación y esfuerzo máximos [28].

Posterior a esto, se modeló la placa de 14 milímetros. En el recuadro azul de la Figura 11 se especifican los intervalos de la malla. En el recuadro verde se determina que la carga perpendicular sería del tipo distribuida y los límites de aplicación de la misma. Dado que las condiciones de frontera impiden el desplazamiento de los nodos ubicados en los bordes de la placa, la zona sombreada en la vista previa representa la aplicación de una carga normal únicamente sobre los nodos con libertad de desplazamiento, es decir que no se encuentran en los bordes de la estructura.

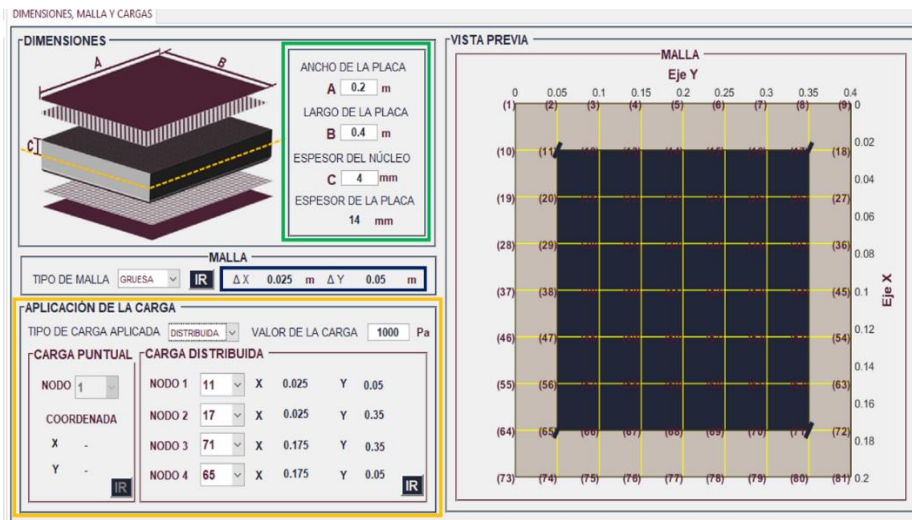


Figura 11. Diseño de placa para aplicación de una carga puntual

Sobre la placa fue aplicada una carga perpendicular distribuida P de 1000 Pascales con el fin de calcular la distribución de esfuerzos interna y la deformación. Tanto la deformación como el esfuerzo normal alcanzaron su magnitud máxima en el nodo central de la malla y los resultados se detallan en los recuadros naranja y gris en la Figura 12, respectivamente. Por otra parte, el recuadro de color verde contiene la información del tiempo requerido para encontrar la solución, así como el número de iteraciones necesarias.

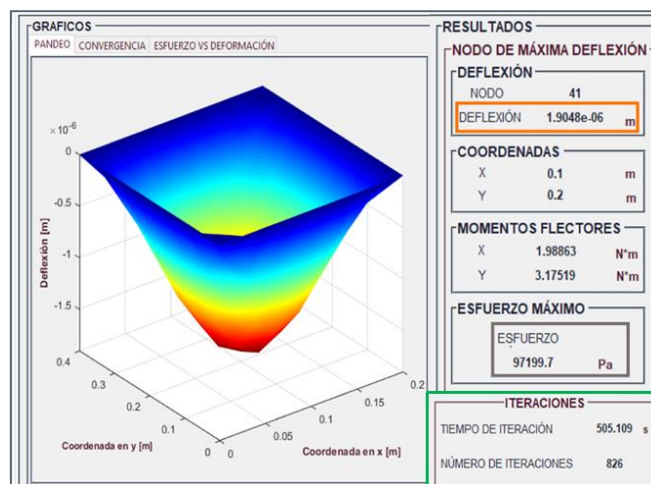


Figura 12. Resultados del caso de carga distribuida

Estos datos fueron comparados con los obtenidos por medio del análisis estructural de la misma placa realizado en ANSYS y los resultados de la deformación son mostrados en la Figura 13. Al igual que en el caso resuelto en ARCUM, el caso resuelto en ANSYS indicó que la máxima deformación se presentó en el nodo ubicado en el centro de la malla.

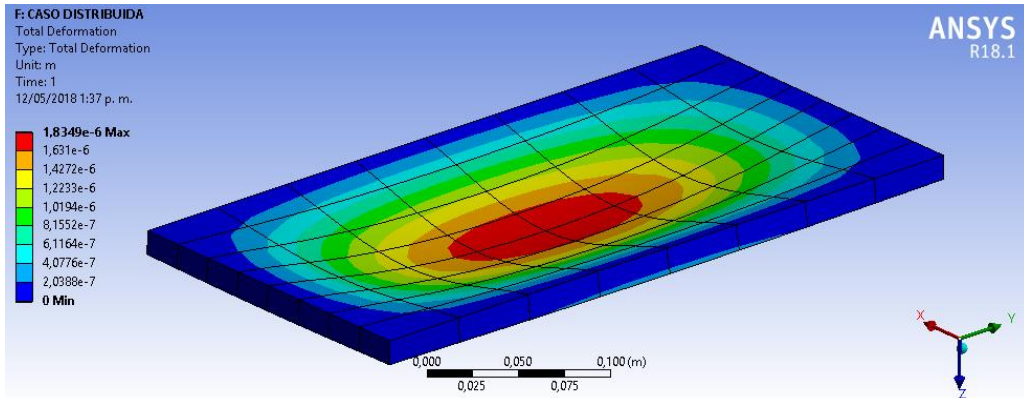


Figura 13. Deformación de la placa del caso de carga distribuida en ANSYS

En la Tabla 5 se presenta la comparación de esfuerzos y deformaciones determinando un error del 2,91% y 3,54% respectivamente, evidenciando que el resultado de la deformación arrojado por ARCUM gracias al método de diferencias finitas permite obtener valores comparables a los obtenidos mediante software especializado de análisis estructural.

Tabla 5. Comparación de esfuerzos y deformaciones del caso de carga distribuida

Característica	Resultados de referencia	Resultados ARCUM	Error porcentual
Esfuerzo [MPa]	1,002e+05	9,727e+04	2,91%
Deformación [m]	1,83500e-06	1,90480e-06	3,54%

Adicionalmente, se partió del análisis realizado en la Universidad Carlos III de Madrid, donde se evaluó la deformación de placas de distintas propiedades mecánicas y dimensiones aplicando distintos métodos numéricos de solución, incluyendo el método de diferencias y elementos finitos [20]. Este análisis seleccionado parte de las características del material resaltadas en el recuadro rojo de la Figura 14, de las dimensiones de la placa resaltadas en el recuadro verde de la misma figura y de una carga P de 10000 Pascales distribuida sobre toda la superficie, cuya zona de aplicación es delimitada en el recuadro amarillo del módulo de modelado de la placa de ARCUM.

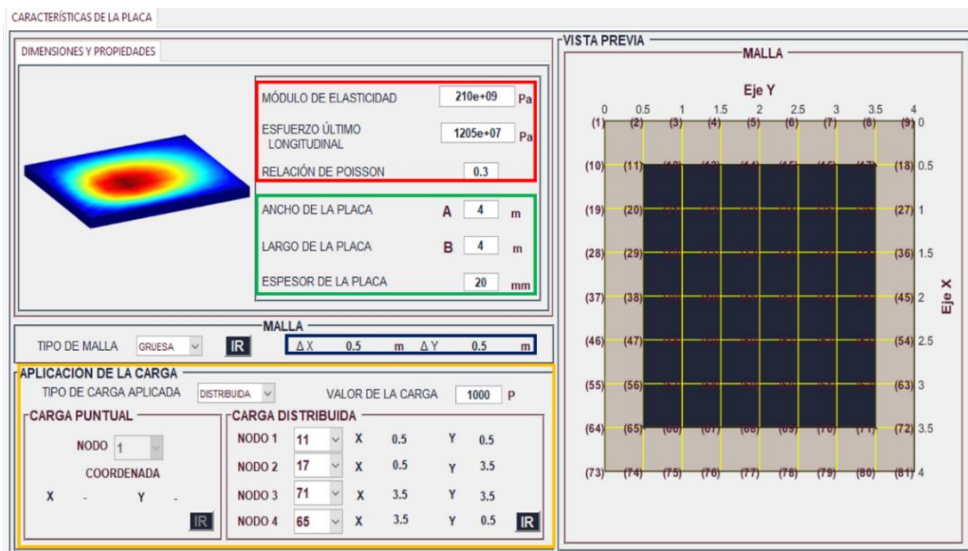


Figura 14. Modelado de la placa del caso de la Universidad Carlos III de Madrid

La ejecución de este caso de estudio por parte de los autores de la Universidad Carlos III de Madrid, determinó un valor de deflexión máxima de $3,379e10^{-3}$ metros, mientras que el valor máximo de deflexión proporcionado por ARCUM, mostrado en la Figura 15 es de $3,373e10^{-3}$ metros.

De igual manera al caso anterior, se realiza el análisis de deformación en ANSYS, con el fin de proporcionar un valor adicional de comparación, del cual se obtienen los resultados ilustrados en la Figura 16. Los valores obtenidos en los tres casos son comparados en la Tabla 6.

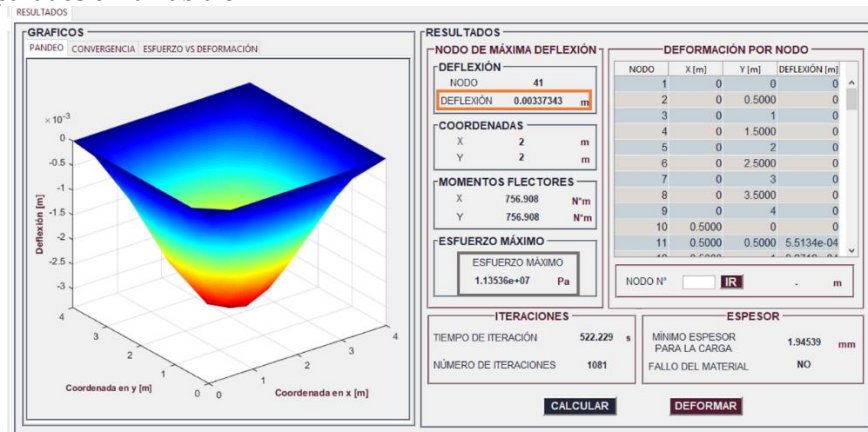


Figura 15. Resultados del caso de la carga distribuida obtenidos de ARCUM.

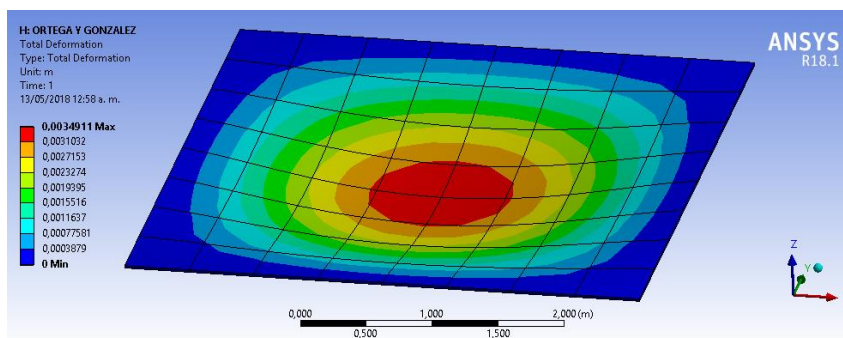


Figura 16. Deformación de la placa del caso de la Universidad Carlos III de Madrid en ANSYS

Tabla 6. Comparación de esfuerzos y deformaciones del caso de la de la Universidad Carlos III de Madrid

Característica	Resultados ANSYS	Resultados ARCUM	Universidad Carlos III de Madrid
Esfuerzo [MPa]	1,071e+07	1,135e+07	-
Deformación [m]	3,491e-03	3,373e-03	3,37900e-03

A partir de estos valores se calculó el porcentaje de error entre ANSYS y el análisis realizado por los autores españoles, el cual fue de 3,21%, mientras que el error entre el valor calculado en ANSYS y el valor calculado en ARCUM fue de 3,37%, teniendo el primero de estos un 0,16% más de exactitud que el segundo. Adicionalmente, se calculó el porcentaje de error entre el valor máximo del esfuerzo normal obtenido por medio de ANSYS y el obtenido a partir de ARCUM, siendo este de 5,05%, siendo el valor máximo de error de todas las pruebas realizadas y estando por encima del valor real obtenido.

3.4 Caso de carga parcialmente distribuida sobre la estructura

Para el caso de una carga parcialmente distribuida sobre un área determinada de la placa se realizó el mismo procedimiento de los casos anteriores, pero en este caso se diseñó una lámina de fibra de carbono y resina epóxica, cuyas características se presentan en el recuadro rojo la Figura 17. En este caso, el 45% del volumen de la lámina corresponde al refuerzo en fibra de carbono y el 55% del volumen corresponde a la resina epóxica seleccionada.

LAMINA

SELECCIÓN DE MATERIAL

FIBRA
 VIDRIO
 CARBONO
 KEVLAR

MATRIZ
 POLIAMIDA
 EPÓXICA
 POLIESTER

CARACTERÍSTICAS DE LA LÁMINA

ESPESOR: 2.4 mm

PROPIEDADES MECÁNICAS

	FIBRA	MATRIZ
FRACCIÓN VOLUMÉTRICA	0.45	0.55
MÓDULO DE ELASTICIDAD	2.24e+11 Pa	4.5e+09 Pa
GRAVEDAD ESPECÍFICA	1.75	1.2
RELACIÓN DE POISSON	0.2	0.4
DENSIDAD	1750 kg/m ³	1200 kg/m ³
FRACCIÓN MÁSCA	0.544041	0.455959

LÁMINA SIN ORIENTACIÓN

MÓDULO LONGITUDINAL: 5.56623e+10 Pa
MÓDULO TRANSVERSAL: 5.56623e+10 Pa
DENSIDAD: 1447.5 kg/m³
RELACIÓN MAYOR DE POISSON: 0.0537962
RELACIÓN MENOR DE POISSON: 0.0537962

CALCULAR

ORIENTACIÓN

VARIACIÓN: MÓDULO LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL | MÓDULO CORTANTE | RELACIÓN DE POISSON

LÁMINA FINAL

MÓDULO LONGITUDINAL: 5.56623e+10 Pa
MÓDULO TRANSVERSAL: 5.56623e+10 Pa
MÓDULO CORTANTE: 3.89e+09 Pa
RELACIÓN MAYOR DE POISSON: 0.0537962

ÁNGULO DE ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS: 0°

SELECCIONAR ÁNGULO

Figura 17. Diseño de lámina del caso de carga parcialmente distribuida

Las características mecánicas de la lámina fueron comparadas con las características de referencia y reportadas en la Tabla 7 [21]. El error fue calculado como en los casos anteriores, donde se evidencia que el error máximo encontrado es de 2,96% y el módulo de elasticidad se encuentra por encima de los valores proporcionados por la referencia bibliográfica.

Tabla 7. Comparación de constantes elásticas del caso de carga parcialmente distribuida

Característica	Resultados de referencia	Resultados ARCUM	Error porcentual
Módulo de elasticidad [MPa]	5,40e+10	5,56e+10	2,96%
Módulo cortante [MPa]	4,00e+09	3,89e+09	2,80%
Relación de Poisson	0,05	0,05	0,0%

A partir de la lámina anterior, se diseñó un laminado de 30 centímetros de largo, 10 centímetros de ancho y 2,4 milímetros de espesor, para ser sometida a una carga distribuida perpendicular de 30 Pascales en media porción de la placa como se observa en la Figura 18. Los resultados de la deformación y esfuerzo normal obtenidos desde ARCUM son presentados en la Figura 19, donde se incluye una visualización y los resultados numéricos. La misma placa y condición de carga fue simulada con la ayuda de ANSYS y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 20.

DIMENSIONES, MALLA Y CARGAS

DIMENSIONES

ANCHO DE LA PLACA: A = 0.3 m
LARGO DE LA PLACA: B = 0.1 m
ESPESOR DE LA PLACA: 2.4 mm

MALLA

TIPO DE MALLA: GRUESA
ΔX: 0.0375 m ΔY: 0.0125 m

APLICACIÓN DE LA CARGA

TIPO DE CARGA APLICADA: DISTRIBUIDA | VALOR DE LA CARGA: 30 Pa

CARGA PUNTUAL

NODO	X	Y
1	0.0375	0.0125
17	0.0375	0.0875
44	0.15	0.0875
38	0.15	0.0125

VISTA PREVIA

MALLA Eje Y: 0 a 0.1
Eje X: 0 a 0.3

Figura 18. Modelado de la placa del caso de carga parcialmente distribuida

RESULTADOS

GRÁFICOS

PAÑDEO | CONVERGENCIA | ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

RESULTADOS

DEFLEXIÓN

NODO DE MÁXIMA DEFLEXIÓN: 32
DEFLEXIÓN: 1.95418e-07 m

COORDENADAS

X: 0.1125 m
Y: 0.05 m

MOMENTOS FLECTORES

X: 0.0377735 N·m
Y: 0.00444129 N·m

ESFUERZO MÁXIMO

ESFUERZO: 21740.3 Pa

ITERACIONES

TIEMPO DE ITERACIÓN: 651.104 s
NÚMERO DE ITERACIONES: 1131

ESPESOR

MÍNIMO ESPESOR PARA LA CARGA: 1.53348e mm
FALLO DEL MATERIAL: NO

CALCULAR **DEFORMAR**

Figura 19. Resultados del caso de carga parcialmente distribuida

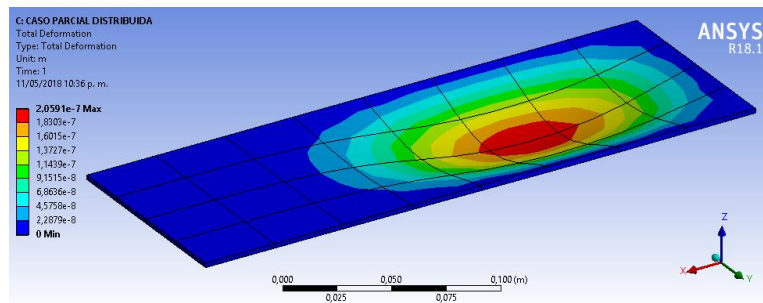


Figura 20. Deformación de la placa del caso de carga parcialmente distribuida en ANSYS

En la Tabla 8 se comparan los resultados en términos del error porcentual. Se encontró que la diferencia en magnitud del esfuerzo normal máximo y la deformación máxima no supera el 5% para este caso de validación.

Tabla 8. Comparación de esfuerzo y deformación máxima del caso de carga parcialmente distribuida

Característica	Resultados de referencia	Resultados ARCUM	Error porcentual
Esfuerzo [MPa]	2,289e+04	2,174e+04	5,00%
Deformación [m]	0,00000020591	0,0000001954	5,00%

4. CONCLUSIONES

La investigación desarrollada permitió demostrar la validez de los resultados obtenidos a través de la aplicación ARCUM, en términos de la deformación máxima y esfuerzo normal máximo debidos a una carga perpendicular distribuida o puntual, actuando sobre una estructura tipo sándwich fabricada en materiales compuestos. El aplicativo desarrollado se basó en el método de diferencias finitas para tal fin.

En la comparación realizada entre las propiedades mecánicas calculadas por ARCUM y las obtenidas a partir de referencias bibliográficas, se evidenció que el módulo de Young es la variable en la se presenta un mayor error, mientras que la relación de Poisson posee el menor error entre los parámetros comparados.

Los resultados de esfuerzo y deformación máximos calculados con la herramienta ARCUM, tienden a estar por debajo del valor obtenido en ANSYS y reportado por los autores consultados, indicando una posible visualización de falla antes de tiempo, evitando utilizar materiales que se encuentren al límite de su resistencia.

Se identificó que el caso de carga que invierte menos tiempo en determinar el vector deformación es el de carga puntual, utilizando entre 431 y 485 segundos que equivalen a 7,1 y 8 minutos respectivamente, a diferencia del caso de carga distribuida en donde la inversión de tiempo se encuentra en un intervalo de 505 y 522 segundos, que equivalen a 8,4 y 8,7 minutos respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] P. R. Alvarado, Mechanical properties characterization of advanced composite materials, a review, Bogotá: Colombian Air Force Graduate School, 2014.
- [2] V. Birman y G. Kardomateas, «Review of current trends in research and applications of sandwich structures,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 142, pp. 221-240, 2018.
- [3] K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- [4] J. Loughlan, *Thin-walled structures : advances in research, design and manufacturing technology*, New York: Taylor and Francis Group, 2004.
- [5] P. Carranza, J. Escobar y J. E. Gaitan, «Estudio del rendimiento aerodinámico de un ala de envergadura variable para un planeador de entrenamiento,» *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, Medellín, Instituto Antioqueño de Investigación, 2016, pp. 232-246.
- [6] J. E. Gaitan, H. Sanchez y J. Niño, «Análisis de la estructura alar de un planeador para microsustentación usando elementos finitos y cálculos analítico,» *Ingenium*, vol. 15, n° 30, pp. 73-94, 2014.
- [7] M. K. Buragohain, *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*, New York: Taylor and Francis, 2017.
- [8] X. Wu, H. Yu, Guo, L. L. Zhang, X. Sun y Z. Chai, «Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure,» *Composite Structures*, vol. 213, pp. 165-172, 2019.
- [9] J. Qu, D. Ju, S. Gao y J. Chen, «Research on the dynamic mechanical properties of polymethacrylimide foam sandwich structure,» *Composite Structures*, vol. 204, pp. 22-30, 2018.
- [10] V. Pandyaraj, A. Rajadurai y G. Anand, «Experimental investigation of compression strength in novel sandwich structure,» *Materials today: proceedings*, vol. 5, n° 2, pp. 8625-8630, 2018.
- [11] Y. Chen, S. Hou, K. Fu, X. Han y L. Ye, «Low-velocity impact response of composite sandwich structures: Modelling and experiment,» *Composite Structures*, vol. 168, pp. 322-334, 2017.

- [12] S. Abrate y M. Sciuva, «Equivalent single layer theories for composite and sandwich structures: A review,» *Composite Structures*, vol. 179, pp. 482-494, 2017.
- [13] T. Li y L. Wang, «Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials,» *Composite Structures*, vol. 175, pp. 46-57, 2017.
- [14] G. Sun, X. Huo, D. Chen y Q. Li, «Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels,» *Materials and Design*, vol. 133, pp. 154-168, 2017.
- [15] J. Liu, J. Liu, J. Mei y W. Huang, «Investigation on manufacturing and mechanical behavior of all-composite sandwich structure with Y-shaped cores,» *Composites Science and Technology*, vol. 159, pp. 87-102, 2018.
- [16] A. Carrillo, O. Mendoza y K. I. González, *Introducción al Método de Diferencias Finitas y su Implementación Computacional*, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [17] J. Ezeh, O. Ibearugbulem y C. Onyechere, «Pure Bending Analysis of Thin Rectangular Flat Plates Using Ordinary Finite Difference Method,» *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, nº 3, pp. 20-23, 2013.
- [18] A. N. Flórez, *Software application for supporting the design process with composite materials*, Bogotá D.C.: Universidad de los Andes, 2008.
- [19] J. Gryzagoridis, G. Oliver y D. Findeis, «On the equivalent flexural rigidity of sandwich composite panels,» *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, pp. 140-143, 2015.
- [20] M. Ortega y S. González, «Cálculo de placas a través de distintas metodologías,» Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- [21] D. Gay, *Composite materials: design and applications*, New York: CRC Press, 2014.
- [22] R. Heslehurst, «Composite Sandwich Design Requirements,» *Composites Australia*, pp. 12-13, 2015.
- [23] S. Timoshenko y S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, New York: McGraw-Hill Book Company, 1959.
- [24] R. Szilard, *Theories and applications of plate analysis : classical, numerical, and engineering methods*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [25] D. J. Peery y J. J. Azar, *Aircraft Structures*, McGraw-Hill Book Company, 1982.
- [26] B. Dolicanin, V. B. Nikolic y D. C. Dolicanin, «Application of Finite Difference Method to Study of the Phenomenon in the Theory of Thin Plates,» *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 2, pp. 29-43, 2010.
- [27] M. V. Barton, «Finite Difference Equations for the Analysis of Thin Rectangular Plates with Combinations of Fixed and Free Edges,» Defense Research Laboratory, Austin, Texas, 1948.
- [28] Artlux Europa, «Hoja técnica espuma de poliuretano,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.acebyartcoat.com/espumas-de-poliuretano>.

Caracterización de las propiedades mecánicas a compresión de estructuras tipo sándwich con núcleo celular manufacturadas bajo técnica de deposición fundida

Daniel Agudelo¹

Fabio A. Merchán R.²

Sebastián Nieto³

Sebastián Rodríguez⁴

Universidad de San Buenaventura – Colombia

Actualmente existe una gran variedad de materiales y procesos de manufactura que suplen las necesidades de los diferentes sectores industriales a nivel mundial. Los procesos de investigación, innovación y desarrollo generan constantemente nuevos materiales y tecnologías aplicables a los procesos de diseño y manufactura. Como resultado, los sistemas de producción actuales se enfocan en fabricar una mayor cantidad de partes y componentes, consumiendo la menor cantidad de recursos, mientras se mantienen altos estándares de calidad. Estos requerimientos han desencadenado en el desarrollo de técnicas que reducen el desperdicio de materiales, conocidas como manufactura aditiva (MA), las cuales se caracterizan por adicionar material durante el proceso de producción, en lugar de retirar material de un bloque de materia prima. Este tipo de métodos ofrecen flexibilidad durante las etapas de diseño en términos de la geometría de los componentes a fabricar, la cual no es tradicionalmente ofrecida por las técnicas convencionales de fabricación. El desarrollo de estas nuevas técnicas ha motivado la presente investigación, la cual consiste en la fabricación de probetas de material termoplástico a través de técnicas de modelado por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés), el desarrollo de ensayos mecánicos y el análisis de los resultados obtenidos. Los especímenes fabricados son del tipo sándwich con un núcleo formado por una estructura celular tipo honeycomb. Los resultados obtenidos demostraron que las estructuras fabricadas en material termoplástico con la técnica FDM, tienen una alta resistencia estructural a cargas de compresión, lo que permite que sean consideradas en múltiples aplicaciones industriales, gracias además a su bajo costo de manufactura y baja densidad.

1. INTRODUCCIÓN

En los procesos actuales de fabricación de componentes, las técnicas de manufactura aditiva han ganado terreno y han sido implementadas en grandes industrias aeronáuticas como la Airbus, donde su diseño A350 XWB contó con más de 1000 componentes fabricados bajo la técnica FDM [1] la cual es uno de los procedimientos más populares en la actualidad, ampliamente conocida como impresión 3D. Una de las ventajas de este método de producción es que permite la fabricación de partes con geometrías complejas sin requerir el uso de herramientas especializadas y la intervención humana [2]. Esta tecnología ha sido impulsada y utilizada desde el año 2009 cuando la patente del FDM desarrollada por Scott y Lisa Crump expiró en dicho año [3].

Desde ese momento, se ha implementado en múltiples industrias como salud y bienestar, equipamiento industrial, construcción, artículos electrónicos, automóviles, sector aeroespacial y energético [4]. El sector aeroespacial específicamente, implementa esta tecnología para la fabricación de partes y componentes capa por capa con base a un modelo 3D, evitando así el uso de manufactura sustractiva y formativa [5], los cuales son integrados en aeronaves de transporte de pasajeros, aeronaves militares, aplicaciones espaciales y sistemas de misiles. Este método ofrece ventajas como la posibilidad de producir geometrías complejas, la reducción de costos y la implementación de materiales de altas prestaciones a través de tiempos de manufactura cortos [6]. No obstante, este procedimiento nace a partir de la implementación de materiales poliméricos, gracias a sus características físicas y químicas que permiten moldear a bajo costo la materia prima utilizada. La combinación de esta tecnología usando materiales plásticos ha encontrado nicho en la creciente industria de las aeronaves no tripuladas, incrementando el espectro de aplicaciones en la industria aeroespacial [7] – [13].

En el país son pocos los estudios enfocados al estudio de las características y aplicaciones de esta reciente tecnología, por tal motivo, la presente investigación se enfocó en determinar las características mecánicas de estructuras fabricadas a través de técnicas de manufactura aditiva (deposición fundida) y que están sometidas a cargas de compresión. El material seleccionado es el Ácido Poliláctico (PLA por sus siglas en inglés) debido a su popularidad entre los usuarios y a que es un material biodegradable, de bajo costo, buena rigidez y resistencia, buena precisión dimensional y larga vida útil [14] – [18]. Los ensayos mecánicos desarrollados se ajustaron a normativas estándar de materiales de la Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) orientados a la caracterización de probetas bajo la acción de cargas de compresión. La norma ASTM C365 deriva un amplio rango de conceptos en relación con materiales de núcleo utilizados en estructuras tipo sándwich como materiales porosos, espumas, estructura en forma de panel de abeja (honeycomb) en aluminio y aramida, entre otros [19]. Dos geometrías diferentes del tipo honeycomb fueron sometidas al ensayo y los resultados obtenidos se presentan en el presente documento, en términos del esfuerzo último de compresión plano y el módulo de compresión plano. Por último, se

¹ dagudelo@usbog.edu.co

² fmerchan@usbog.edu.co

³ asnieto@academia.usbog.edu.co

⁴ srodriguezmelomelo@academia.usbog.edu.co

realizó la comparación entre materiales que se utilizan en la industria como el Aluminio y Nomex para honeycomb, con valores derivados de experimentaciones realizadas por la compañía HEXCEL [20], se compararon los valores de esfuerzo último y módulo de compresión para dos tamaños de celda estipulados. Los resultados presentados son válidos para una referencia específica del material termoplástico suministrado por el proveedor Prusament y para geometrías que han sido fabricadas y probadas bajo las condiciones especificadas en este documento.

Sin embargo, las técnicas de MA conllevan nuevos desafíos durante las etapas de diseño llevando a los ingenieros a formular sus conceptos teniendo en cuenta las particularidades, beneficios y limitaciones de este nuevo enfoque de producción, enfocado en el desarrollo de técnicas que permiten implementar nuevos materiales en cadenas de producción [21] – [23].

2. MÉTODO

La investigación se enfoca en determinar las características mecánicas de probetas tipo sándwich fabricadas en PLA sometidas a ensayos destructivos a compresión, el desarrollo de dichos ensayos se basa en los procedimientos, recomendaciones e instrucciones que estipula la norma ASTM C365. Para tal fin, se diseñó un protocolo de manufactura, control de calidad y de ensayos destructivos para determinar las variables presentes durante el desarrollo de la investigación. Inicialmente, se determinó en el protocolo de manufactura un estándar en los valores de configuración para el proceso de impresión, el cual fue designado en CATIA arrojando dos configuraciones de especímenes. A continuación, se desarrollaron pruebas de impresión para encontrar los parámetros de impresión adecuados. La geometría de los especímenes se estableció mediante las restricciones estipuladas en la norma ASTM C365. Para este estudio se utilizó un método de prueba estabilizado para el núcleo, el cual consiste en el uso de superficies continuas adheridas en la parte inferior y superior del núcleo, esto con el fin de evitar aplastamiento local de algunas celdas del núcleo, adicional a ello debido a que normalmente en la industria aeroespacial las pruebas a compresión son realizadas con elementos de prueba estabilizados [19].

La cantidad de especímenes fabricados está acorde con los requerimientos establecidos por la norma de ensayos ASTM C365, teniendo en cuenta las variables propuestas y descritas a lo largo de esta misma [19]. Se desarrollaron probetas con dos tamaños de celda de estructuras celulares tipo honeycomb con el mismo espesor de pared, altura de celda, altura de capa y temperatura de extrusión. Para cada configuración geométrica se fabricó un mínimo de cinco probetas conforme a la especificación de normativa.

2.1 Características de celda

La geometría definida para una sola celda del honeycomb se considera como un prisma hexagonal como se muestra en la Figura 1, las características inherentes para una sola celda se incluyen en la Tabla 1. La relación de aspecto (A_r) es el cociente entre el valor de la altura (H) de la celda y el valor de longitud de vértice (L) [24].

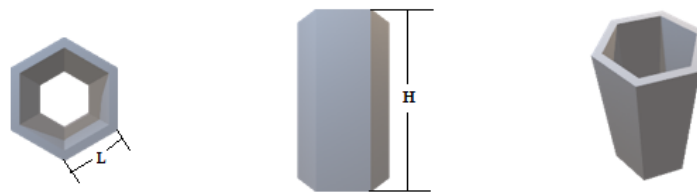


Figura 1. Prisma hexagonal

Tabla 1. Características de celda

Geometría	Caras	Aristas	Vértices	Volumen	Área Superficial
Prisma Hexagonal	8	18	12	$\frac{3\sqrt{3}}{2} L^3 A_r$	$3\sqrt{3} L^2 (1 + 2A_r/\sqrt{3})$

2.2 Densidad relativa y nominal

La densidad relativa de una estructura celular es el parámetro que determina las prestaciones que puede ofrecer la estructura celular bajo la condición de trabajo requerido. La densidad relativa se define como el cociente de la densidad del material (ρ^*) el cual conforma el honeycomb, sobre la densidad del sólido o núcleo (ρ_s). A medida que aumenta la densidad relativa de la estructura celular, mayor será el esfuerzo a compresión máximo que podrá soportar, independientemente del tipo de material utilizado [24]. El cálculo de la densidad relativa para la celda de una estructura celular hexagonal prismática se da mediante la ecuación (1).

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{t^2}{L^2} \left\{ 1 + \frac{3}{2A_r} \right\} \quad (1)$$

Por otro lado, el cálculo de la densidad nominal del panel se establece mediante el volumen de la estructura celular y su peso, el cual depende de la densidad del material PLA utilizado para fabricar los especímenes [24].

2.3 Propiedades del honeycomb en el plano (*out-of-plane*)

Cuando se consideran las propiedades de una estructura celular tipo honeycomb en el plano denominado como “*out of plane*”, es preciso resaltar que una carga uniaxial se aplica en la dirección al eje Z, como se visualiza en la Figura 2.

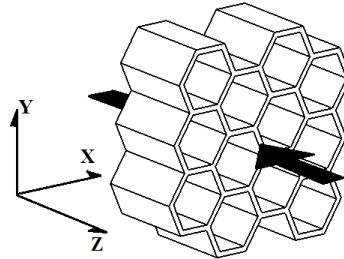


Figura 2. Carga de compresión aplicada en dirección al eje Z siendo paralela a la orientación de celda

Al aplicar dicha carga de compresión sobre el plano en cuestión, el comportamiento de las paredes de las celdas será análogo a la dirección de carga aplicada, para este caso, las paredes se comprimen por lo cual los valores de módulo de elasticidad y esfuerzos son mucho más grandes en comparación a estructuras celulares cargadas en el plano (*in plane*). Estas características permiten el diseño de estructuras tipo sándwich para diversas aplicaciones, algunas de ellas centradas en el campo aeroespacial, como por ejemplo superficies de control, palas de rotores y superficies sustentadoras [9], [11], [12].

2.4 Manufactura de modelado por deposición fundida (FDM)

Una máquina de control numérico que utiliza la técnica por deposición fundida debe poder controlar las características de la impresión, tales como temperatura de extrusión, temperatura de plataforma, posicionamiento de plataforma, densidad de relleno, velocidad de impresión, altura de capa, selección y configuración de patrón de material de soporte, entre otras. Todas estas particularidades son controladas por medio de un software de código compatible con la máquina. Para la presente investigación se utilizó uno de código abierto denominado *FlashPrint*, este software se encarga de convertir cualquier modelo 3D dado en formato STL en un formato *Gcode*, el cual se exporta hacia la impresora 3D.

La manufactura aditiva produce objetos en una sucesión de capas desde la cara inferior, hacia arriba. El termoplástico es fundido y depositado por un extrusor en capas sucesivas conservando la altura determinada por el diseñador. El tiempo de impresión está relacionado con la altura de capa, la velocidad de alimentación y densidad de relleno, además del tamaño y complejidad de las piezas a fabricar. El modelado por deposición fundida es una tecnología que permite realizar piezas con complejas geometrías, aunque existen algunas restricciones acerca de las características de impresión como el correcto espesor de filamento, desuniones entre capas de material depositado y residuos de carbono en el extrusor por elevadas temperaturas. En la Figura 3 se presenta el trabajo desarrollado por el extrusor durante la fabricación de los especímenes.

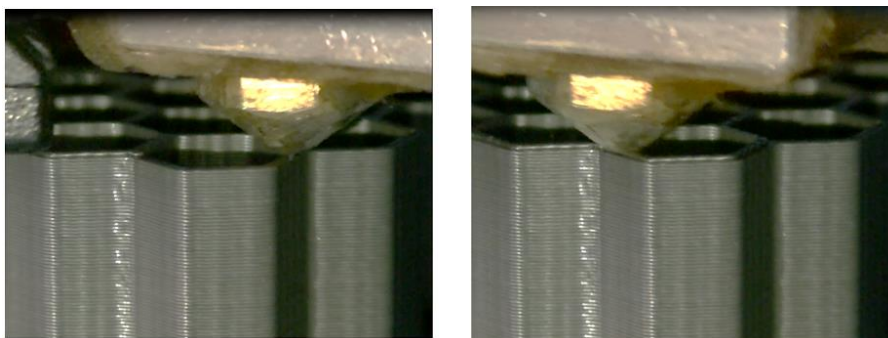


Figura 3. Proceso de FDM para construcción de celdas en honeycomb

2.5 Normativa ASTM C365

La norma ASTM C365 / C365 M-16 establece los parámetros y procedimientos para someter núcleos utilizados en estructuras tipo sándwich a una carga uniaxial de compresión, con el fin de poder determinar las propiedades mecánicas del núcleo. A partir de la prueba se pudo determinar el módulo de compresión y el esfuerzo de compresión

último para cada una de las probetas. Para poder efectuar el desarrollo satisfactorio de la prueba, la norma sugiere utilizar por lo menos cinco especímenes por cada configuración geométrica. Además, según el documento de estandarización para pruebas a núcleos de estructuras tipo sándwich establecido como un documento "Military Standard" MIL-STD-401B [25], el número de especímenes seleccionado depende de las condiciones que requiera el ente experimentador bajo el diseño experimental estipulado, en el cual para este caso se establece en el numeral 8.1 de la norma ASTM C365. Se estableció fabricar siete especímenes por cada configuración específica, en caso de presentarse errores en la impresión, la cual está en función al tamaño de celda seleccionado.

Un parámetro esencial para la adquisición de datos precisos en las pruebas experimentales es establecer la geometría final del espécimen. La norma limita ciertas características como el número de celdas que debe tener el honeycomb por espécimen, el tamaño de celda y el área transversal total de prueba que está en función al tamaño de celda seleccionado. En la Tabla 2, se establecen las áreas mínimas que recomienda la norma para los tamaños de celda más comunes utilizados en la industria. Por consiguiente, dichas áreas están establecidas para poder probar un número mínimo de celdas por espécimen las cuales son 60 celdas [19].

Tabla 2. Área transversal recomendada para espécimen de prueba [19]

Celda Mínimo (mm)	Celda Máximo (mm)	Área Transversal Mínima (mm ²)
.....	3.0	625
3.0	6.0	2500
6.0	9.0	5625

Por otra parte, la norma requiere que los revestimientos (*facing*) de la probeta deben ser paralelos entre sí y deben formar un contacto superficial uniforme sobre toda la dimensión del núcleo, de modo que sean perpendiculares a los lados perimetrales del núcleo.

2.6 Diseño de especímenes de prueba

El diseño de los especímenes se realizó por medio de dos softwares de diseño asistido. Inicialmente se utilizó el software de código abierto OpenSCAD para generar la geometría del núcleo de honeycomb. Luego, con la ayuda de CATIA se completó el diseño de la probeta agregando los revestimientos superior e inferior y se establecieron las dimensiones de las probetas para dar cumplimiento a las exigencias de la norma de ensayos implementada. A partir de pruebas piloto de fabricación, se determinó que las dimensiones de las celdas de la estructura interna de las probetas serían de 3/8 y 1/4 de pulgada, ya que la máquina de impresión 3D puede fabricar adecuadamente dichas estructuras, debido a sus limitaciones respecto al diámetro de la boquilla del extrusor. En la Tabla 3 se describen los aspectos geométricos de cada núcleo utilizado para el desarrollo del proyecto.

Tabla 3. Propiedades geométricas de núcleos fabricados

ID Especimen	Tamaño Celda (mm)	Área Transversal Especimen (mm ²)	Celdas
A	9,525	6453,584	120
B	6,35	5766,377	270

El diseño del espécimen A parte del tamaño de celda de 9,525 milímetros o 3/8 de pulgada. En la Figura 4 se presenta una vista isométrica del espécimen A. La altura del núcleo debe ser mayor a 2 mm y menor a 20 cm [25]. Para este caso se utilizó las características geométricas disponibles comercialmente, con el fin de comparar los resultados obtenidos con materiales tipo sándwich utilizados en la industria [20]. Acorde al numeral 8,4 de la norma ASTM implementada, la máxima desviación bidireccional permitida en la altura del núcleo es del 0,05%. Acorde al numeral 8,3 de la misma referencia, la tolerancia bidireccional permitida a lo largo y ancho del espécimen es del 1% [19]. El proceso de control de calidad implementado después de la fabricación del lote de probetas permitió corroborar que todas las geometrías cumplieran con los requisitos de la norma.

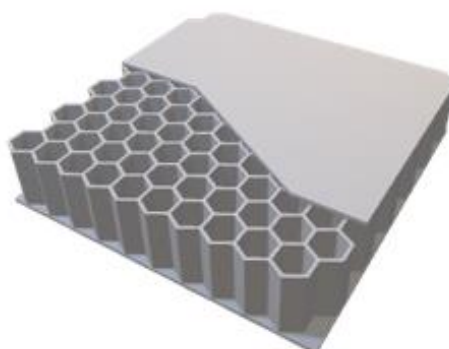


Figura 4. Vista de corte isométrica del espécimen A generada en CATIA V5

El diseño del espécimen B parte del tamaño de celda de 6,35 milímetros o 1/4 de pulgada. Se utilizaron los mismos atributos geométricos aplicados al lote A. Al finalizar la fabricación de los especímenes, el proceso de control de calidad permitió determinar que las dimensiones de las probetas se encontraban en el rango de tolerancia permitido por la norma de ensayo utilizada. En la Figura 5 se presenta una vista isométrica para el espécimen B.

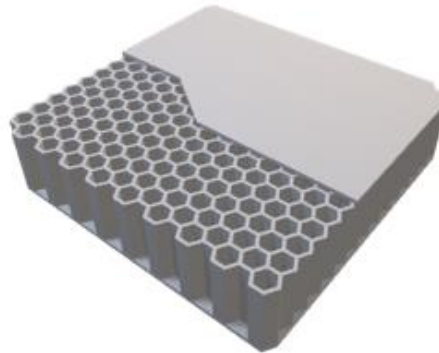


Figura 5. Vista de corte isométrica del espécimen B Generado en CATIA V5

2.7 Proceso de fabricación de especímenes

A continuación, se presentan los valores más importantes establecidos de las variables de impresión de las probetas, con el fin de obtener un proceso de impresión estandarizado para cada lote. La altura de capa se estableció como 0,18 mm; la temperatura del extrusor se mantuvo constante a un valor de 218°C; la temperatura de la plataforma fue de 50°C; la velocidad de alimentación del extrusor se configuró a 60 mm/s; la velocidad de desplazamiento del extrusor fue de 80 mm/s. Para la fabricación de los revestimientos inferior y superior se estableció un total de 3 capas de material. Para ninguna de las probetas se utilizó material de soporte. Se imprimieron 14 especímenes en total para las dos configuraciones establecidas. En la Figura 6 se muestra el lote de impresión correspondiente a la configuración tipo A. En la Figura 7 se muestra el lote de impresión para los especímenes tipo B. Los especímenes impresos fueron almacenados en un contenedor para evitar el contacto directo con los rayos del sol y cubiertos con gel de sílice para evitar la acumulación de humedad dentro del contenedor.

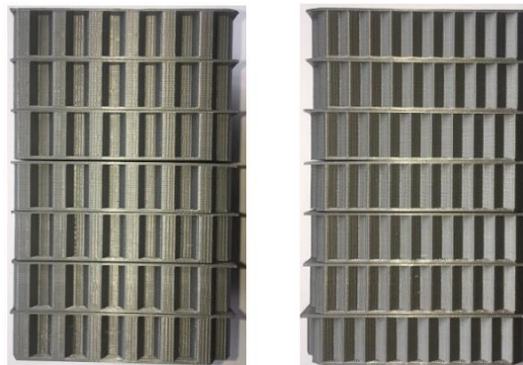


Figura 6. Lote de impresión A en PLA

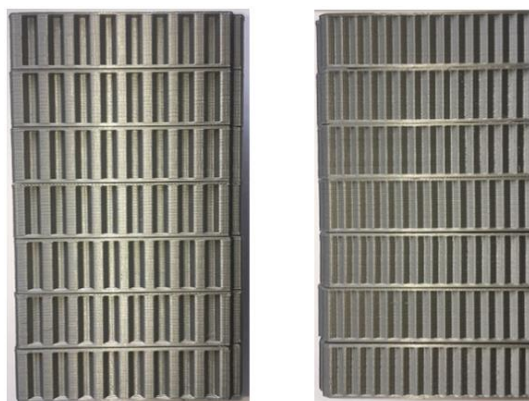


Figura 7. Lote de impresión B en PLA

Fue preciso establecer un periodo de enfriamiento de la plataforma de impresión antes de retirar cada espécimen, debido al comportamiento del material por los cambios de temperatura. De hacerlo de forma prematura, la estructura interna de la probeta tendería a contraerse debido al choque térmico y las dimensiones geométricas variarían,

afectando las propiedades mecánicas del espécimen fabricado. Para sobreponerse a esta dificultad, se desarrolló un análisis de la tasa de enfriamiento de la zona de impresión a través de un sensor FLIR T300. Los resultados obtenidos a través de 48 fotografías tomadas durante 27 minutos después de concluir la impresión, se presentan en la Figura 8. Para cada fotografía se registraron 4 áreas de referencia las cuales miden la temperatura en los extremos de la plataforma. El procesamiento de las imágenes se realizó mediante el software FLIR Tools. Los parámetros para la adquisición de las fotografías térmicas y configuración de la cámara fueron los siguientes:

- Emisividad: 0,86
- Temperatura de reflexión: 50 °C
- Distancia: 1 metro
- Temperatura Atmosférica: 17 °C
- Temperatura óptica externa: 20 °C
- Transición óptica externa: 1
- Humedad Relativa: 68 %
- Tipo de Lente: FOL 10 mm

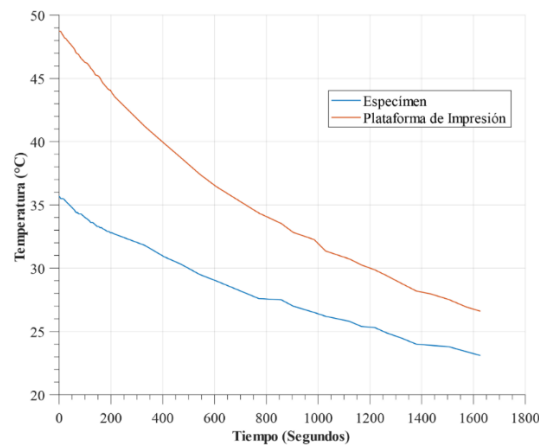


Figura 8. Tasa de enfriamiento del espécimen y plataforma de impresión

2.8 Control de calidad de los especímenes

El control de calidad se divide en dos fases. Para la primera fase se realizó una inspección visual de cada espécimen, este proceso incluyó el control y vigilancia del proceso de impresión, para prevenir que se presentaran fallas durante la deposición del material PLA para la conformación del espécimen. Con el fin de ilustrar errores presentes en el proceso de fabricación, en la Figura 9(a) se muestra un defecto menor en la deposición del material en el revestimiento superior durante pruebas piloto de impresión, lo que llevo a evaluar parámetros como el número de capas y su espesor, porcentaje de relleno y el multiplicador de extrusión. Del mismo modo, en la Figura 9(b) se ilustra un defecto mayor encontrado durante pruebas de impresión referente a la separación de los filamentos de capas adyacentes, evaluando así parámetro como la altura de las capas y temperatura de impresión.

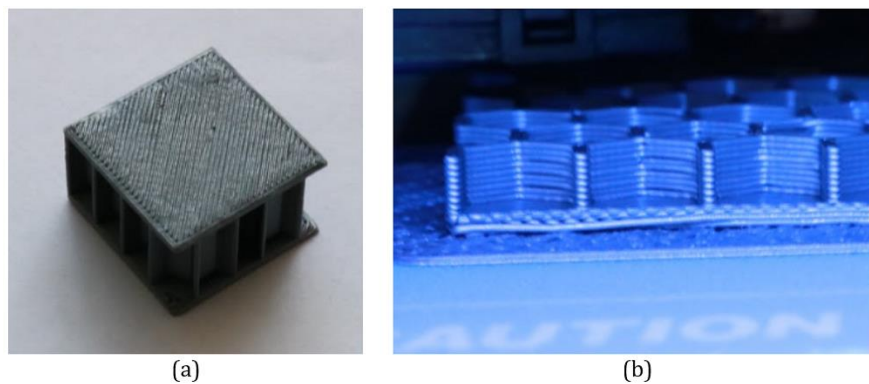


Figura 9. Defecto menor y mayor durante pruebas de impresión

A seguir, se llevó a cabo la inspección visual de cada espécimen para determinar los posibles defectos de impresión generados. Las probetas que presentaran desviaciones superiores de sus características geométricas (largo, ancho y alto), mayores a las tolerancias establecidas por la norma, debían descartarse [26]. Adicionalmente, la presencia de defectos mayores como la separación de las capas de filamentos desencadenaría en el descarte de la muestra. Sin embargo, ninguno de los especímenes violó estos requisitos, logrando así superar el proceso de control de calidad llevado a cabo.

2.9 Pruebas a compresión

Las pruebas a compresión se desarrollaron utilizando la máquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU. Las condiciones de la prueba se configuraron teniendo en cuenta los requerimientos de la norma ASTM C365. La velocidad de desplazamiento del cabezal de compresión fue de 2 mm/min. La Figura 10 muestra la secuencia de la prueba antes, durante y después de comprimir el espécimen.

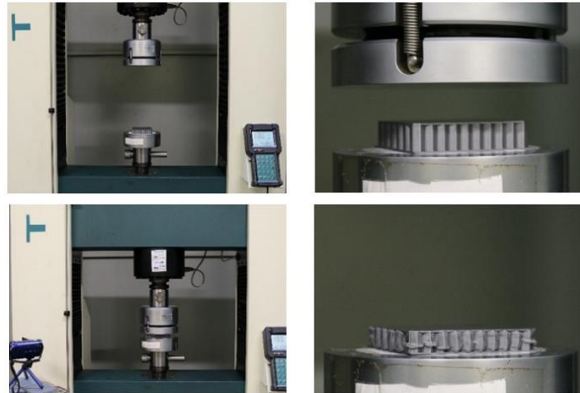


Figura 10. Prueba y posicionamiento del espécimen en maquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU

2.10 Cálculo de propiedades mecánicas del espécimen

La norma ASTM C365 exige determinar el esfuerzo último de compresión plana, el esfuerzo de compresión al 2% de la deformación total del espécimen y el módulo de compresibilidad del espécimen. La magnitud de estos valores se toma mediante la información proporcionada por la maquina universal de ensayos y por las ecuaciones planteadas en la norma ASTM C365 en el numeral 13 y descritas a continuación [19].

- *Esfuerzo último de compresión plana.* El esfuerzo último de compresión plana se calcula mediante la relación entre la carga última o máxima carga soportada por el espécimen antes de alcanzar la falla y el área transversal del espécimen. El valor de la carga máxima se determina mediante la gráfica de esfuerzo-deformación en la cual se puede evidenciar el momento en que el espécimen falla plásticamente o las celdas colapsan plásticamente. El área transversal del espécimen se tomó de las mediciones geométricas realizadas para cada espécimen en el control de calidad estipulado. Aplicando la ecuación (2) se determina el esfuerzo último del espécimen a analizar.

$$F_z^{fcu} = P_{max}/A \quad (2)$$

Donde:

F_z^{fcu} = Máxima esfuerzo a compresión plana [MPa].

P_{max} = Carga ultima previa a la falla [N].

A = Área transversal del espécimen [mm²].

- *Esfuerzo al 2% de la deformación.* La norma ASTM C365 exige determinar el esfuerzo que soporta el espécimen cuando se haya alcanzado un valor igual al 2% de la deformación en función del valor de la altura inicial del espécimen. En los reportes de la prueba de cada espécimen se registran los valores de carga al 2 % de deformación para cada espécimen probado mediante el análisis de la gráfica de esfuerzo-deformación. El esfuerzo es calculado con la Ecuación (3).

$$\sigma_z^{fc0,02} = P_{0,02}/A \quad (3)$$

Donde:

$\sigma_z^{fc0,02}$ = Esfuerzo de compresión plana al 2% de deflexión [MPa].

$P_{0,02}$ = Carga aplicada correspondiente al $\delta_{0,02}$ [N].

A = Área transversal del espécimen [mm²].

- *Módulo de compresibilidad.* La norma ASTM C365 requiere calcular el módulo de compresibilidad del espécimen a través de una expresión que permite conocer el *Chord Modulus* o módulo secante del comportamiento elástico de la probeta, esta ecuación se basa en la diferencia de dos puntos de esfuerzo aplicado en la zona elástica del espécimen representados en la gráfica de esfuerzo-deformación, inicialmente la norma ASTM C365 estipula los dos valores de deformación unitaria en un rango de 0.3 y 0.1 %, estos valores han sido seleccionados para representar el comportamiento inicial de la gráfica de esfuerzo-deformación teniendo en cuenta la corrección realizada por efectos de asentamiento o ajuste de holgura del espécimen al momento de aplicar la carga de

compresión. Este comportamiento se conoce como *toe compensation* [19] y se define como la corrección realizada a la gráfica donde se estipula un punto de deformación porcentual cero al instante donde el comportamiento elástico del material tienda a comportarse linealmente. Para materiales que presenten un comportamiento no lineal en la zona elástica, es necesario realizar una corrección en la zona del comportamiento elástico para calcular el módulo. En la Ecuación (4) se muestra la expresión utilizada para calcular el módulo de compresibilidad.

$$E_z^{fc} = \left((P_{0,07} - P_{0,04})t \right) / \left((\delta_{0,07} - \delta_{0,04})A \right) \quad (4)$$

Donde:

E_z^{fc} = Módulo de compresibilidad del espécimen [MPa].

t = Espesor del espécimen medido previo a la prueba [mm].

$P_{0,07}$ = Carga aplicada correspondiente al $\delta_{0,07}$, [N].

$P_{0,04}$ = Carga aplicada correspondiente al $\delta_{0,04}$, [N].

$\delta_{0,07}$ = Valor de deflexión registrada tal que δ/t es cercano al 7 %.

$\delta_{0,04}$ = Valor de deflexión registrada tal que δ/t es cercano al 4 %.

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas destructivas a compresión en estructuras celulares tipo honeycomb para las dos configuraciones geométricas utilizadas. En las gráficas de esfuerzo-deformación de los lotes de probetas A y B, se evidencia el comportamiento elástico y plástico de los especímenes, obtenidas después de someterlos a carga de compresión en la máquina universal de ensayos.

3.1 Propiedades mecánicas de los especímenes del lote A

Siete especímenes fueron sometidos a pruebas de compresión plana o tipo *flatwise*. La norma ASTM C365 requiere al menos 5 pruebas válidas para obtener resultados confiables respecto a las características mecánicas de la configuración sometida a prueba. En la Figura 11 se presenta la variación del esfuerzo a compresión en relación con la deformación unitaria porcentual de todos los especímenes probados. Como se puede observar, el comportamiento elástico de los especímenes A1 hasta el A6 tienden a tener el mismo valor para el módulo de compresión. Sin embargo, el espécimen A7 presentó una deformación no uniforme, concentrándose en una esquina del espécimen y por ende la estructura del honeycomb falló bajo una condición de carga menor que el resto de los especímenes, dicho comportamiento pudo deberse a factores de impresión como la velocidad de impresión, temperatura del extrusor, entre otras, adicional a ello una falla a compresión no uniforme del núcleo de honeycomb es un modo de falla no aceptable, por ende se considera un espécimen invalido [19].

Adicionalmente, se puede apreciar que el esfuerzo último alcanzado por el espécimen A4 tiene un valor menor en comparación con los especímenes A1, A2, A3, A5 y A6. Se puede evidenciar que se presenta en el rango porcentual de deformación entre el 10 al 18 %, la zona plana de esfuerzo mecánico en la cual el valor de esfuerzo tiende a permanecer constante, por encima de la temperatura de transición vítrea el termoplástico se deforma de manera plástica [27], esto debido al calentamiento que sufre el material durante la deposición. Durante el proceso de control de calidad aplicado antes de la prueba, el espécimen A4 presentó un defecto crítico que posiblemente ocasionó que el valor de esfuerzo último soportado por el espécimen A4 estuviera fuera de la tendencia y por ello fuera descartado de igual forma que el espécimen A7.

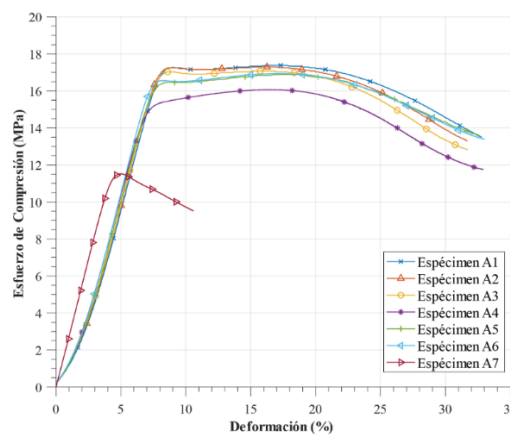


Figura 11. Esfuerzo de compresión vs deformación lote A

En la Figura 12 se muestra el comportamiento mecánico de los especímenes del lote A seleccionados como las muestras representativas de los ensayos mecánicos efectuados.

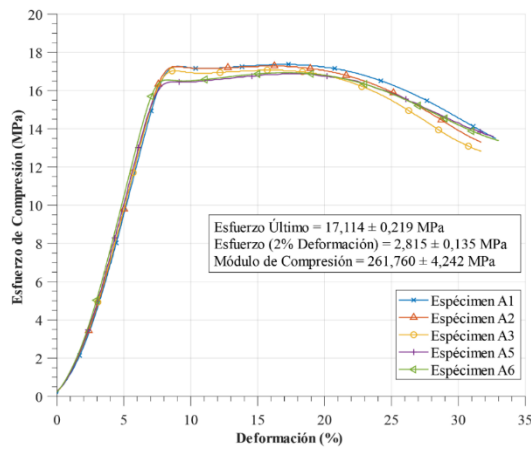


Figura 12. Esfuerzo de compresión vs deformación de probetas seleccionadas del lote A

En la Tabla 4 se registra el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación del esfuerzo último de compresión, del esfuerzo al 2 % de deformación y del módulo de compresión de los siete especímenes probados. El módulo de compresión de las probetas se calculó como la pendiente de la región elástica obtenida en las gráficas, en un intervalo entre el 4% y 7% de deformación unitaria, ya que en este intervalo se presentó un comportamiento lineal de la función.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los especímenes seleccionados del lote A

Especímen	F_z^{fcu} (MPa)	$\sigma_z^{fc0,02}$ (MPa)	E_z^{fc} (MPa)
Promedio Simple	17,114	2,8415	261,760
Desviación Estándar	0,219	0,136	4,242
Coeficiente de Variación (%)	1,280	4,780	1,620

3.2 Especímenes del lote B

Siete especímenes fueron sometidos a prueba. En la Figura 13 se presenta la variación del esfuerzo a compresión en relación con la deformación unitaria de todos los especímenes probados. Se puede observar que el compartimiento elástico tiende a ser constante para todos los especímenes. Por otro lado, se puede evidenciar que el comportamiento plástico de los especímenes tiende a ser constante cuando se comienza a alcanzar el esfuerzo máximo, hay que resaltar que en dicha zona se presentan pequeñas variaciones del esfuerzo donde tiende a comportarse en alguna secciones de la curva como una oscilación o a permanecer constante y luego saltar a un valor mayor de esfuerzo, este comportamiento concuerda con la teoría en la cual se infiere que los honeycombs cargados a compresión en el plano *out-of-plane* cuando sobrepasan su límite elástico, las columnas o celdas comienzan a colapsar gradualmente generando efectos de asentamiento dentro del honeycomb, por lo cual, se generan cambios repentinos del esfuerzo hasta llegar al valor máximo. Por último, se puede apreciar que el fenómeno de densificación de las celdas no se presenta, esto puede explicarse debido a que las columnas o celdas están conformadas por sucesiones de capas de material las cuales en algún punto tenderán a colapsar o doblarse entre sí y como consecuencia el desprendimiento de dichos filamentos no permitirá que el material tienda a acumularse en bucles y aumente de manera repentina el esfuerzo como ocurre en estructuras celulares fabricados en materiales como aluminio [24].

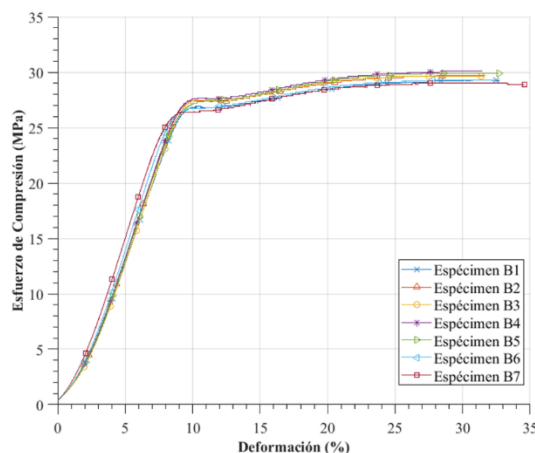


Figura 13. Esfuerzo de compresión vs deformación lote B

De igual forma, se descartaron los especímenes que no estuvieron dentro de la tolerancia estipulada por la desviación estándar del total de valores obtenidos para las tres características mecánicas de las probetas probadas. Se

seleccionaron los especímenes B6 y B7 ya que los valores de esfuerzo están por fuera de la tendencia. En la Figura 14 se muestra el comportamiento mecánico de los especímenes del lote B seleccionados como las muestras representativas de los ensayos mecánicos efectuados.

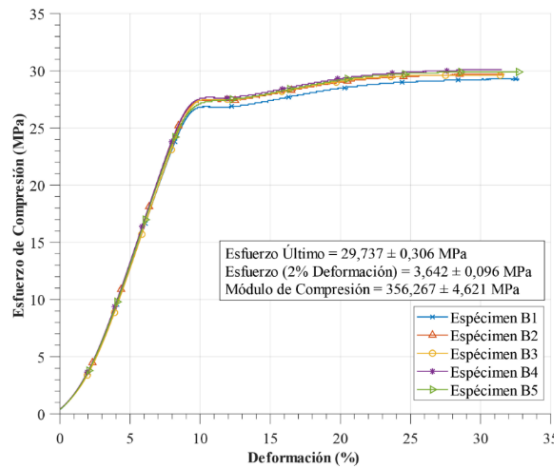


Figura 14. Esfuerzo de compresión vs deformación de probetas seleccionadas del lote B

En la Tabla 5 se registra el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación del esfuerzo último de compresión, del esfuerzo al 2 % de deformación y del módulo de compresión de los siete especímenes probados.

Tabla 5. Propiedades mecánicas de los especímenes seleccionados del lote B

Especímen	F_z^{fcu} (MPa)	$\sigma_z^{fc0,02}$ (MPa)	E_z^{fc} (MPa)
Promedio Simple	29,737	3,642	356,267
Desviación Estándar	0,306	0,096	4,621
Coeficiente de Variación (%)	1,030	2,629	1,297

4. DISCUSIÓN

Con base a los resultados obtenidos a partir de las pruebas desarrolladas en los dos lotes de probetas se identificaron los siguientes aspectos.

4.1 Comparación de propiedades de especímenes del lote A

Se realizó una comparación de las propiedades mecánicas obtenidas de las probetas del lote A en función del valor promedio del módulo de compresión con datos experimentales de estructuras celulares tipo honeycomb fabricadas en aluminio y aramida. Para tal fin, se emplearon datos obtenidos por la empresa Hexcel para tres configuraciones de estructuras celulares con tamaño de celda igual a 3/8 de pulgada [20]. Se puede apreciar que la magnitud del módulo de compresión de las estructuras fabricadas en aluminio es mayor a la magnitud del módulo de compresión obtenido para estructuras constituidas en PLA, esto debido a que el aluminio es mucho más rígido y por lo tanto tiende a deformarse en menor medida que el plástico.

Por tal motivo, la zona elástica es mayor y esto genera un valor del módulo de compresión más grande, adicional a ello la linealidad que se presenta en la región elástica de los especímenes es debida a la deformación lineal de las paredes de la celda del material hasta que alcanza el esfuerzo máximo [28]. Por otra parte, se puede evidenciar que el honeycomb producido en PLA soporta un esfuerzo último mayor que aquellos producidos en aluminio, esto en primera instancia se debe a que el honeycomb de PLA tiene una mayor densidad nominal y por lo tanto tiene mucho más material en su composición que es capaz de soportar la carga aplicada durante el fenómeno de colapso de las celdas [29], como se muestra en la Tabla 6. Además, la elasticidad que presenta el plástico en comparación al metal es mayor y puede ser un indicio de que el comportamiento mecánico del PLA permite a la estructura celular deformarse en una mayor proporción y por lo tanto puede soportar una carga más elevada antes de que colapsen las celdas del panel, en congruencia con la elasticidad presentada, un valor alto del módulo de fluencia implica una tasa baja de velocidad de fluencia [27], esto soportado también por el espesor de las paredes de la celda permitiendo la deformación plástica con un alto punto de fluencia [30].

Tabla 6. Comparación de propiedades mecánicas de estructuras celulares del lote A

Propiedad	PLA	CR III 5052	CR III 5056	HRH-10
Densidad Nominal (gr/cm^3)	1,339	0,067	0,048	0,048
Módulo (MPa)	261,760	930,792	634,318	117,211
Esfuerzo último (MPa)	17,114	3,861	2,344	2,206

4.2 Comparación de propiedades de especímenes del lote B

Igual que con el lote anterior, se compararon las características mecánicas de las probetas del lote B con las propiedades de estructuras fabricadas y probadas por la empresa Hexcel y que tienen un tamaño de celda igual a 1/4 de pulgada y los resultados se muestran en la Tabla 7. Se puede apreciar que el módulo de compresión de las estructuras constituidas de aluminio es mayor en comparación con el módulo de estructuras fabricadas en termoplástico PLA. Sin embargo, el esfuerzo último es mayor para las probetas fabricadas en PLA. Sin importar el material ni la referencia comercial de la distribución de 1/4 de pulgada, se aprecia que en general logra desarrollar un mayor módulo de compresión y soportar un esfuerzo último mayor, esto debido a una mayor densidad de celdas en la composición estructural.

Tabla 7. Comparación de propiedades mecánicas de estructuras celulares del lote B

Propiedad	PLA	CR III 5052	CR III 5056	HRH-10
Densidad Nominal (gr/cm^3)	1,434	0,096	0,083	0,064
Modulo (MPa)	356,267	1620,269	1585,795	193,053
Esfuerzo último (MPa)	29,737	7,584	5,654	3,309

5. CONCLUSIONES

A partir de las pruebas de impresión desarrolladas a lo largo de la investigación, se determinó que la temperatura que presenta un mejor proceso de extrusión para el material PLA del fabricante Prusament es de 218 °C. Adicionalmente, en las cuales se pudo identificar que el filamento logra una mejor adherencia a la cama de impresión al mantenerla a una temperatura de 50°C, proporcionando así, adherencia uniforme en las primeras capas de extrusión y evitando así el fenómeno de alabeo de las primeras capas.

El desarrollo de la investigación permitió evidenciar un gran potencial de los métodos de manufactura aditiva en la industria aeroespacial, ya sea para la fabricación de partes y componentes en metales o en material termoplástico de geometrías complejas y bajo costo de producción. Dentro de los parámetros más influyentes en las propiedades estudiadas de estructuras celulares tipo honeycomb se encontró el tamaño de la celda, temperatura del extrusor, temperatura de la superficie de impresión, altura entre capas, velocidad de alimentación del extrusor y la velocidad de desplazamiento del extrusor. Esta tecnología aplicada a los materiales termoplásticos ofrece ventajas como bajo costo de producción, programación de fabricación por demanda, la manufactura de piezas con geometrías complejas y se demostró que posee una alta resistencia a las cargas de compresión.

La fabricación de elementos para la industria aeroespacial utilizando material termoplástico PLA, vislumbra aplicaciones en partes y componentes que no requieren un certificado tipo para ser incluidos en aeronaves, debido a que este tipo de material actualmente no posee un certificado que lo habilite para tal fin. Por tal motivo, la creciente industria de las aeronaves no tripuladas, que no se encuentra limitadas por estos aspectos técnicos y legales, tiene un gran potencial en el desarrollo de nuevos prototipos basados en esta técnica de fabricación, impactando positivamente los tiempos de desarrollo y costos de manufactura.

La manufactura aditiva a diferencia de la sustractiva y la formativa, permite la disminución de desperdicios de material, debido a que se utilizan cantidades exactas de material, acorde a parámetros de impresión seleccionados. Por otra parte, al requerir la fabricación de partes de grandes dimensiones, implica un aumento significativo en el tiempo de impresión, impactando de forma negativa los costos de producción.

Se pudo identificar que la deposición incorrecta de filamento en una sucesión continua de capas en el conformado del Honeycomb, conlleva a generar concentradores de esfuerzo por los cuales las celdas colapsan.

La configuración estructural que presenta el mayor valor de esfuerzo último de compresión corresponde al tamaño de celda de 1/4 de pulgada en comparación con la configuración de tamaño de celda de 3/8 de pulgada debido a que se tiene una mayor densidad nominal en la estructura celular, esto se traduce en un mayor volumen de material para la misma área que soporta una carga de compresión aplicada. Adicionalmente, la configuración estructural que presenta el mayor módulo de Young para el material PLA del fabricante Prusament es la estructura con tamaños de celda de 1/4 de pulgada, por encima del valor registrado por la configuración de 3/8 de pulgada.

REFERENCIAS

- [1] Euronews, «How 3D printing is driving efficiency in aviation,» *Euronews*, p. 1, 11 06 2015.
- [2] A. Sood, R. Ohdar y S. Mahapatra, «Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement,» *Journal of Advance Research*, vol. 3, n° 1, pp. 81-90, 2 Junio 2011.
- [3] S. Crump, «Apparatus and method for creating three-dimensional objects». Estados Unidos Patente US5121329A, 1898.
- [4] AM-motion, «A strategic approach to increasing Europe's value proposition for additive manufacturing technologies and capabilities,» European Commission, Spain, 2016.

- [5] ASTM international, «ASTM52900 Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology,» ASTM, Barr Harbor Drive, PO, 2015.
- [6] J. C. Najmon, S. Raeisi y A. Tovar, «Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry,» de *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Elsevier, 2019, pp. 7-31.
- [7] N. Ahmed y J. Page, «Manufacture of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Advanced Project,» *Applied Mechanics and Materials*, Vols. %1 de %2397-400, pp. 970-980, 2013.
- [8] G. Goh, S. Argawala, V. Dikshit, S. Sing y W. Yeong, «Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential,» *Aerospace Science and Technology*, vol. 63, pp. 140-151, 2016.
- [9] M. Kujawa, «Assessment of 3D printing as a manufacturing technology for drones wings,» de *Interdyscyplinarność badań naukowych 2017*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2017, pp. 66-71.
- [10] S. Ravundrababu, Y. Govdeli, Z. Wong y K. Erdal, «Evaluation of the influence of build and print orientations of unmanned aerial vehicle parts fabricated using fused deposition modeling process,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 34, pp. 659-666, 2018.
- [11] M. Seung Ki, T. Yu En, H. Jihong y Y. Yong-Jin, «Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 1, n° 3, p. 223-228, 2014.
- [12] D. Walker, D. Liu y A. Jennings, «Wing Design Utilizing Topology Optimization and Additive Manufacturing,» de *Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, San Diego, California, USA, 2016.
- [13] J. Stefan y S. Werner, «Application of Sustainable Design in Additive Manufacturing of an Unmanned Aerial Vehicle,» de *International Conference on Sustainable Design and Manufacturing*, Heraklion, Greece, 2016.
- [14] K. Jaya Christiyani, U. Chandrasekhar y K. Venkateswarlu, «Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer,» *Jou. of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, n° 3, p. 363-367, 2018.
- [15] Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee y K. Lee, «Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA,» *Materials & Design*, vol. 123, pp. 154-164, 2017.
- [16] Simplify3D, «Materials guide,» Simplify3D, 2019. [En línea]. Available: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/>. [Último acceso: 10 Mayo 2019].
- [17] H. Yazdarni Sarvestani, A. H. Akbarzadeh, H. Niknam y K. Hermenean, «3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance,» *Composite structures*, vol. 200, pp. 886-909, 5 Abril 2018.
- [18] A. Kumar Sood, R. Ohdar y S. Mahapatra, «Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,» *Materials & Design*, vol. 31, n° 1, pp. 287-295, 2010.
- [19] ASTM International, «ASTM C365 / C365M-16 Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores,» ASTM, Barr Harbor Drive, PO, 2016.
- [20] Hexcel, «HexWeb Honeycomb Attributes and Properties,» Hexcel, Stamford, Connecticut, 2016.
- [21] M. Kamal y G. Rizza, «Design for metal additive manufacturing for aerospace applications,» de *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Elsevier, 2019, pp. 67-86.
- [22] S. Fafenrot, N. Grimmelsmann, M. Wortmann y A. Ehrmann, «Three-Dimensional (3D) Printing of Polymer-Metal Hybrid Materials by Fused Deposition Modeling,» *Materials*, vol. 10, p. 1199, 19 Octubre 2017.
- [23] C. Lee, S. Kim, H. Kim y S. Ahn, «Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts,» *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. %1 de %2187-188, pp. 627-630, 2007.
- [24] L. J. Gibson y M. F. Ashby, *Cellular Solids Structures and Properties*, Segunda ed., vol. I, Cambridge University Press, 1997.
- [25] Departamento de defensa de Estados Unidos de America, «MIL-STD-401B, Military Standards: Sandwich constructions and core materials, general test methods,» Washington D.C., 1956.
- [26] Departamento de defensa de Estados Unidos de America, «MIL-STD-105E, Military standard: Sampling procedures and tables for inspection by attributes,» Washington D.C., 1963.
- [27] W. Smith y J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, México D.F: McGraw Hill, 2014.
- [28] N. Sawal, A. B. Mohd Nazri y H. Md Akil, «Effect of cell size material on the mechanical properties of honeycomb core structure,» *International Journal of Science and Research*, pp. 80-84, 2015.
- [29] S. Xu, J. Beynon, D. Ruan y G. Lu, «Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs,» *Composites structures 94*, vol. 94, n° 8, pp. 2326-2336, 2012.
- [30] D. Pollard, C. Ward, G. Herrmann y J. Etches, «The manufacture of honeycomb cores using Fused Deposition Modeling,» *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, vol. 3, n° 1, pp. 21-31, 26 Abril 2017.

Una revisión técnico-ambiental de la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura residual en Colombia

Juan C. Acevedo P.¹

Luis C. Becerra O.²

Astrid Z. Acevedo R.³

Fausto R. Posso R.⁴

^{1,4} Universidad de Santander

^{2,3} Universidad Francisco de Paula Santander
Colombia

La necesidad de buscar nuevas fuentes de energía renovable que complementen y sustituyan en el largo plazo, a los combustibles fósiles, proyectan a la biomasa como una materia prima potencial, y dentro de ella, el Aceite de Fritura Residual (AFR) se perfila como una alternativa favorable. En el presente trabajo se realizó una revisión sistemática de literatura de las publicaciones científicas en la base de datos Scopus® y complementado con la revisión de contenido web sobre la producción de biodiésel a partir del AFR, desde la perspectiva técnica y ambiental. Se evaluó la disponibilidad y gestión del AFR, estimando una generación anual de 60 millones de litros en Colombia, con un 80% de ácidos grasos que pueden convertirse en biodiésel con un rendimiento del 98,4%. En la dimensión técnica se examinó su proceso productivo, las características fisicoquímicas del AFR y del biodiésel. En la dimensión ambiental se establece que la utilización del AFR para la producción de biodiésel evita la contaminación de las fuentes hídricas por una gestión adecuada del mismo y que la sustitución del diésel convencional por biodiésel reduce las emisiones de CO y SO₂ en 17,7% y 58,8%, respectivamente. El AFR se cataloga como una materia prima atractiva para la producción de biodiésel de segunda generación en Colombia, atendiendo a su alta disponibilidad e impacto ambiental positivo.

1. INTRODUCCIÓN

Los efectos desfavorables del uso masivo y generalizado de los combustibles fósiles son cada vez más patentes. Ambientalmente, el calentamiento global y la disminución de la capa de ozono, como resultado del incremento continuo de los gases de efecto invernadero (GEI), son los ejemplos más palpables de ello. Así, para el año 2015, las emisiones mundiales de dióxido de carbono atribuibles a la quema de combustibles fósiles ascendieron a 32.294 Mt, con un crecimiento anual promedio del 2,5% en los últimos 40 años. Por su parte, en Colombia tales emisiones fueron de 72,32 Mt, representando el 0,22% del total mundial [1]. Esta situación indeseable tiende a agravarse al tomar en cuenta que el consumo de energía en el mismo año ascendió a 9.384 Mtep, con un crecimiento promedio del 2,4% [2]. Sin duda, este incremento desmedido en el consumo trae consigo desequilibrios económicos y sociales, ya que las reservas de fuentes fósiles son limitadas, a lo cual hay que añadir los conflictos geopolíticos derivados de la distribución geográfica desigual de dichas reservas [2].

Por tanto, es imperante el desarrollo de vectores energéticos alternativos a los fósiles que ayuden a superar los inconvenientes señalados y conduzcan el desarrollo de la sociedad humana por la ruta de la sostenibilidad ambiental [3]. Las fuentes primarias renovables de energía, y los vectores que de ellas se derivan, están constituyéndose en una alternativa idónea para diversificar la canasta energética y mitigar la contaminación ambiental, incrementando continuamente su participación en el consumo de energía, tal que para el año 2015 representaron el 19,3% de la demanda mundial, mientras que la potencia eléctrica de origen renovable ascendió a 2.017 GW en el año 2016, equivalente al 24,5% de la generación mundial [4].

Dentro de los vectores de energía renovables, los biocombustibles han recibido especial atención, debido a su versatilidad, aplicabilidad, amplias perspectivas de desarrollo si se aplican adecuadamente las técnicas agrícolas y estrategias de procesamiento [5], [6] y potencial para disminuir las emisiones de GEI, al menos, en un 50%, cuando su uso se compara con el de los combustibles fósiles [7], [8]. Así, varios biocombustibles, como el biodiésel, el bioetanol y el biogás, obtenidos a partir de diferentes materias primas vegetales y animales, ya están siendo ampliamente comercializados. En el caso del biodiésel, se puede obtener de aceites vegetales como la soya, colza y palma, grasas animales y aceites usados [9], con un incremento sostenido en su producción mundial, tal que en el período del 2006 al 2016, ha pasado de 0,321 (Mb/d) a 33,4 (Mb/d) [2]. Se ha señalado que la creciente penetración del biodiésel en el mercado de los combustibles ofrece oportunidades de desarrollo económico y social para los países de economías emergentes como Colombia [10], con condiciones favorables, geográficas y climáticas, para la producción de biodiésel a partir del aceite de palma [11]. Así la producción de biodiésel de aceite de palma aumentó de 169,4 a 460 mil toneladas entre 2009 y 2017, aportando el 4% de la producción mundial [12]. Este aumento en la producción de biodiésel en el ámbito mundial se debe al resultado de la implementación de estrategias y políticas gubernamentales para el desarrollo y uso de los biocombustibles [13].

¹ jua.acevedo@mail.udes.edu.co

² luis.bcrr2@gmail.com

³ astridzuleimaar@ufps.edu.co

⁴ directormgcti@udes.edu.co

Sin embargo, una crítica importante hacia los biocombustibles, particularmente a la producción de biodiésel a gran escala, radica en que su obtención desde materia prima de origen agrícola podría afectar la seguridad alimentaria, contribuir a la degradación de los suelos y conducir al aumento en el precio de los alimentos [14], [15]. Por tanto, se deben precisar otras fuentes de materia prima sin fines alimenticios, como la higuera (*Ricinus communis*), jatropha, algas y aceite comestible usado. Respecto a este último, en Colombia se comercializan anualmente alrededor de 170 millones de litros de aceite de cocina, de los cuales, el 35% se convierte en residuo al terminar su vida útil [16]. Así, el AFR puede definirse como una sustancia obtenida de material vegetal utilizado en la preparación de alimentos y ya no adecuado para el consumo humano. La eliminación de grandes volúmenes de AFR es un problema ambiental, ya que su descarga en desagües o alcantarillas obstruye las tuberías de la red pública y, cuando es vertido junto con residuos sólidos urbanos o en plantas de tratamiento de aguas residuales, causa problemas técnicos y la contaminación del agua y el suelo [17].

En contraparte, se ha propuesto la utilización del AFR en la fabricación de jabón y en las industrias oleoquímicas [18] y como materia prima alternativa para la producción de biocombustibles [19], uso desarrollado comercialmente en 1998 [20]. En el caso de la producción de biodiésel, se han realizado varios estudios sobre el potencial técnico y económico del AFR: Tsai et al. [21], estudiaron exhaustivamente el uso del AFR en Taiwán; Garrido [22] muestra cómo la utilización del AFR en Argentina podría resolver problemas ambientales, económicos y sociales. Montefrío y Obbard [23] discuten los incentivos económicos para el aprovechamiento del AFR en Marikina City, Filipinas. Thamsiriroy y Murphy [18] estiman la viabilidad de la producción de biodiésel a partir de AFR en Irlanda. Giraçol et al. [24] presentan un análisis del costo ecológico de la producción de biocombustibles partiendo de AFR en la ciudad de Campinas, Brasil. Kumaran et al. [25] exploran la factibilidad de reciclar el AFR para convertirlo en biodiésel en una isla de ecoturismo, Langkawi en Malasia. Zhang et al. [26] analizan las condiciones, retos y oportunidades para utilizar el AFR de los restaurantes en la producción de biodiésel en China. Zhang et al. [27] estudian las políticas relacionadas con el aprovechamiento del AFR como biocombustible, desde dos dimensiones, como herramientas de políticas básicas y en la cadena de suministro de las empresas agroindustriales en China.

Todo lo anterior evidencia que la utilización del AFR como insumo para la producción de biodiésel es un tema abierto y de interés científico, económico, ambiental y social. En el caso de Colombia, puede señalarse el estudio de Saenz et al. [28], quienes hacen una evaluación técnica de la producción de biodiésel a partir de AFR, obteniendo un alto rendimiento en la reacción de transesterificación y concluyendo que su implementación industrial dependería de la viabilidad económica. En varias investigaciones académicas se ha tratado el aprovechamiento del AFR para la producción de biodiésel en Colombia desde diferentes dimensiones [29-31]. En este contexto, se desarrolla este trabajo cuyo propósito es realizar una revisión sistemática de literatura de las publicaciones científicas en la base de datos Scopus® y complementado con la revisión de contenido web sobre la producción de biodiésel a partir de AFR, considerando dimensiones técnicas y ambientales, con el fin de precisar sus ventajas y desventajas como insumo para la producción de biodiésel de segunda generación en Colombia y aportar al conocimiento del uso energético de este residuo doméstico que amenaza con convertirse en un problema ambiental de grandes proporciones.

2. ASPECTOS TÉCNICOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE AFR

En esta sección se analiza la disponibilidad y manejo del AFR en Colombia y se comparan sus características fisicoquímicas con las de otros aceites vegetales. También se describen las etapas del proceso productivo del biodiésel y se evalúa la calidad del biodiésel obtenido en varias investigaciones [19], [28], [32] atendiendo a los parámetros establecidos en la Resolución 9-0963 de 2014 del Ministerio de Minas y Energía y del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [33].

2.1 Disponibilidad y manejo actual del AFR

En cuanto a la disponibilidad de AFR en Colombia para la producción de biodiésel, anualmente se consumen alrededor de 170 millones de litros de aceite de cocina, de los cuales un 35% se convierten en residuo después de su utilización (i.e. 60 millones de litros) que en gran medida son vertidos a los desagües [16]. Esta acción tiene un impacto ambiental negativo en las fuentes hídricas, obstruye la red de alcantarillados y forma películas de grasa sobre el agua que impiden su oxigenación y dificultan su depuración [34]. Además, la reutilización del aceite vegetal por más de tres veces, lo convierte en una fuente potencial de agentes cancerígenos por la generación de radicales libres y acrilamidas [35]. En cuanto a las actividades legales de recolección y aprovechamiento del AFR, en el país existen varias empresas privadas dedicadas a estas actividades. Se encuentra una empresa colombiana que desde 2015 produce biodiésel a partir de aceite de palma y aceites vegetales usados, siendo, para ese entonces, la primera planta en Latinoamérica de procesamiento de este tipo de ácidos grasos y la más grande del continente por su capacidad de producción [36].

Respecto al marco regulatorio y legal de Colombia para la gestión adecuada de este tipo de residuos se cuenta con la Resolución 0316 del 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece las condiciones para la gestión de aceites de cocina usados y otras disposiciones asociadas [37]. Por su parte, la Asociación Colombiana de Aceites y Grasas Comestibles (Asograsas) ha denunciado la existencia de un sector informal que adquiere el AFR para

re-ensarlo y venderlo como aceite nuevo. En su estudio, el 30% del aceite ofertado comercialmente pertenece a este tipo de aceites [16] y su consumo corresponde al 20% del consumo total nacional, aunque en regiones como el Valle del Cauca y la Costa Atlántica, puede llegar hasta el 40% [36]. Esta situación atenta contra la salud de los consumidores por los efectos nocivos de su reutilización y por los compuestos químicos adicionados para modificar sus características físicas, como el color y transparencia, con vistas a su nueva comercialización.

2.1.1 Estudio de caso

En el año 2018 se realizó un estudio en la ciudad de San José de Cúcuta (Colombia) en el cual se desarrolló un diagnóstico de la calidad y disponibilidad del aceite de fritura residual producido en los establecimientos comerciales destinados a la fritura. Para el estudio se encuestaron 21 establecimientos que se encuentran distribuidos en las 10 comunas de la ciudad, se formularon diversas preguntas para indagar sobre el consumo de aceite, tipo de aceite utilizado, el grado de reutilización y la disposición final para conocer la disponibilidad y manejo del AFR.

De acuerdo con los datos obtenidos en el estudio correspondientes al consumo de aceite de cada establecimiento, se clasificaron en tres grupos como se evidencia en la Figura 1. Los grandes consumidores que corresponde al 57,89% del total de los encuestados, con un consumo mayor a los 80 litros/mes; el 31,57% consumen entre 60-80 litros/mes representando los medianos consumidores, entre los pequeños consumidores se evidenció el 10,52% con un consumo entre 41-60 l/mes y finalmente se encuentran los micro consumidores con un consumo mensual menor a 40 litros; adicionalmente se observó que las áreas en las que están ubicados influye en el consumo del aceite, debido a que los grandes consumidores se encontraron en el centro de la ciudad, en donde se desarrolla la mayor parte comercial y donde se concentra gran cantidad de estos establecimientos.

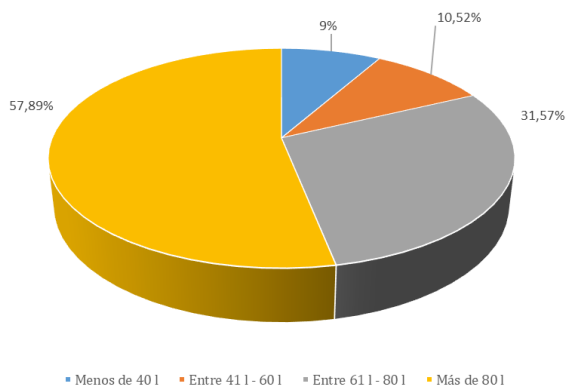


Figura 1. Consumo promedio mensual de aceite

Con respecto a la reutilización del aceite como se muestra en la Figura 2 se evidenció que la mayoría de los establecimientos (38%) reutilizan el aceite más de tres veces a la semana, seguidamente se encontró que el 33% de los encuestados reutilizan solo tres veces el aceite, y un 19% solo lo reutilizan una vez. Solo un 5% decide no reutilizarlo junto con otro 5% que solo lo reutiliza dos veces a la semana. Esta reutilización es menor comparada con lo identificado en el estudio de Ayala [38] en donde los establecimientos reutilizaban el aceite entre 5 a 20 veces; esta acción depende de ciertos factores como: la cantidad de comida preparada, el tipo de alimento, la frecuencia de limpieza, entre otros. El factor de la reutilización es de gran importancia para considerar la calidad del aceite, debido a que esto conduce a que se exponga a altas temperaturas, tiempos de fritura prolongados y a la presencia de oxígeno, lo cual genera componente volátiles y no volátiles a partir de las reacciones de oxidación, lipólisis e hidrólisis que se producen [39]; además de ocasionar la rancidez de los alimentos, la generación de radicales libres y en algunas ocasiones la formación de ácidos grasos trans, perjudicando la salud humana [40].

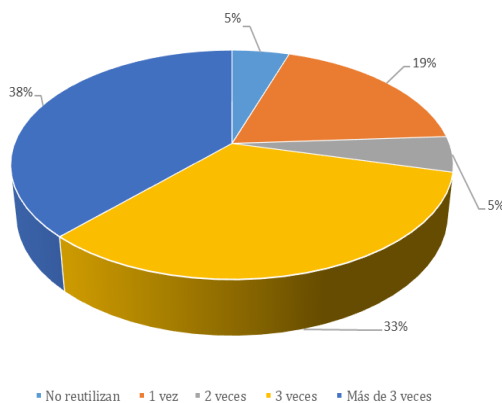


Figura 2. Grado de reutilización del AFR

De acuerdo con la Figura 3 se plantea una relación entre el grado de reutilización y el consumo mensual del aceite, en la que los establecimientos que se encuentran como grandes consumidores reutilizan menos veces el aceite como es el caso de los establecimientos identificados como B y F quienes consumen 300 y 360 litros/mes, respectivamente, sin reutilizar el aceite; a diferencia de aquellos que consumen menos aceite, los cuales realizan más de tres reutilizaciones para hacer frente a la demanda en la fritura de los alimentos y la baja cantidad de aceite con la que laboran; por lo tanto se identificó que entre mayor sea el consumo de aceite, menor será la reutilización a la cual sea expuesto.

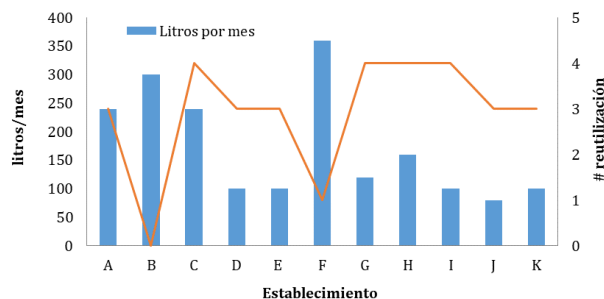


Figura 3. Relación entre el consumo de aceite y su reutilización

Con respecto a la disposición final del AFR se evidenció que aproximadamente un 86% de los establecimientos que se encuestaron venden el aceite con un costo de \$750 por litro, generando un ingreso adicional para su negocio; por otra parte, se encontró que el 14% afirma re-ensavar el AFR y entregarlo a una persona externa como se expone en la Figura 4. Lo anterior expone que, en la ciudad de Cúcuta, los establecimientos encuestados dan una solución adecuada a la problemática ambiental que produce la presencia de este aceite en el alcantarillado y fuentes de agua cuando es vertido por el lavaplatos, sin embargo, en este caso el aceite residual es entregado, lo cual permite que pueda ser aprovechado como materia prima o insumo para nuevos productos. De todas maneras, el vertimiento del aceite se presenta comúnmente en los hogares domésticos debido a la desinformación de las personas acerca de las prácticas adecuadas para su disposición y lograr la disminución del impacto ambiental negativo en las fuentes hídricas.

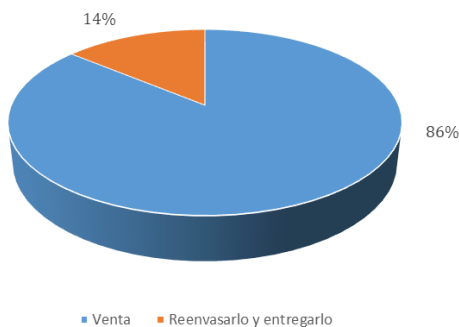


Figura 4. Disposición final del AFR

2.2 Características de calidad del AFR

El AFR puede presentar composición y características fisicoquímicas diferentes a la del aceite comestible virgen del cual se obtiene, ya que ha sido sometido a un proceso térmico con altas temperaturas y largos tiempos de exposición [41]. En la Tabla 1 se presentan las características de una muestra de AFR proveniente de un asadero de pollo y una muestra de aceite de palma crudo.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del AFR y aceite de palma crudo

Parámetro	AFR	Aceite de palma crudo [9],[41],[45]
Perfil de ácidos grasos libres		
Ácido oleico (C18:1)	42,70%	42,40%
Ácido palmítico (C16:0)	33,52%	37,10%
Ácido esteárico (C18:0)	7,44%	5,40%
Densidad (g/cm ³)	0,96	0,92
Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	52,89	39,6
Índice de refracción	1,46	No reporta
Contenido de humedad (%)	0,05	0,20
Índice de acidez (mgKOH/g)	5,12	0,10
Porcentaje de acidez (% Ácido oleico)	2,57	<1
Índice de peróxidos (meqO ₂ /g)	12,5	No reporta
Índice de saponificación (mgKOH/g)	174,70	194,50

El proceso de fritura puede promover diferentes reacciones, como la hidrólisis, que incrementa la cantidad de ácidos grasos libres (AGL), la formación de glicerol libre, mono y diglicéridos en el aceite; la oxidación, con la formación inicial de hidroperóxidos y posterior de aldehídos, cetonas e hidrocarburos; y polimerización, con la formación de dímeros o polímeros a partir de los radicales libres provenientes de los enlaces dobles de los ácidos grasos. La mayoría de estos compuestos son de naturaleza polar y se pueden retirar del aceite usado por adsorción con sólidos porosos naturales o sintéticos [41].

Según la Tabla 1, el AFR tiene un perfil cromatográfico similar al del aceite de palma crudo, lo cual corrobora su capacidad de ser una materia prima adecuada para la producción de biodiésel. El bajo contenido de humedad del AFR se puede atribuir a su reiterada utilización. La calidad del AFR se determina, principalmente, por sus valores de acidez y saponificación, tal que, si se destina a la producción de biodiésel, pueden surgir inconvenientes en el proceso de transesterificación cuando el contenido de AGL en el aceite sea superior al 3% [42]. Un bajo valor del índice de saponificación disminuye la probabilidad de generación de jabones, aumentando así la cantidad de biodiésel [43]. La viscosidad del AFR, 52,8 mm²/s, es significativamente mayor a la del aceite de palma crudo, de 39,6 mm²/s, debido a la formación de ácidos diméricos y poliméricos, y glicéridos en el primero [15].

2.3 Producción de biodiésel a partir de AFR

La producción del biodiésel a partir de esta materia prima sucede en tres etapas: adecuación, transesterificación y purificación. En la Figura 5, se evidencia cada una de ellas en el proceso de obtención del biocombustible a partir de AFR.

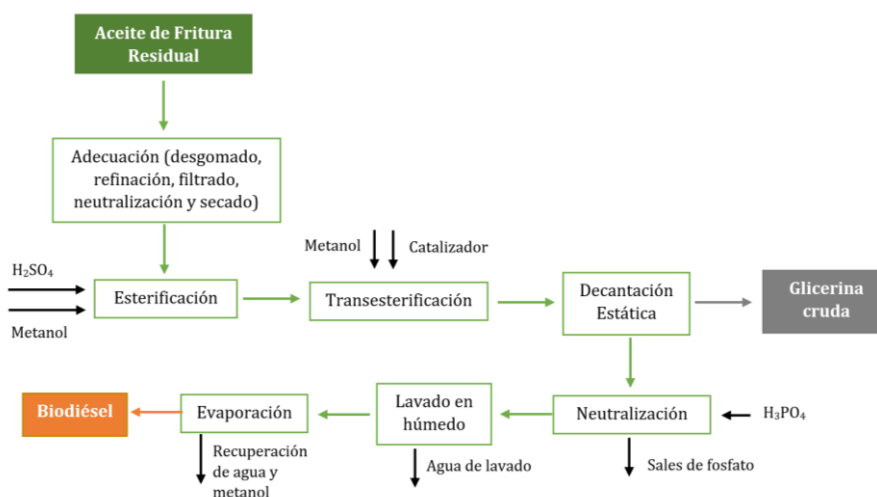


Figura 5. Diagrama de proceso de producción de biodiésel a partir de AFR

- **Adecuación.** Uno de los inconvenientes de utilizar el AFR en la producción de biodiésel es la presencia de material no deseado, principalmente los AGL, impurezas sólidas y agua. El AFR debe someterse a un proceso de desgomado, refinación, filtrado, neutralización y secado, para disminuir el contenido de AGL y de impurezas que pueden causar averías en los equipos y dispositivos del proceso de producción del biodiésel [44] y también para cumplir con los parámetros de calidad exigidos en la Resolución 9-0963 de 2014 [33]. Para la disminución de los AGL en el aceite usado se han estudiado varias técnicas, como la esterificación ácida con metanol y ácido sulfúrico, como catalizador; la esterificación con resinas de intercambio iónico; la neutralización con álcalis seguido de la separación de jabón; y la extracción con líquidos polares junto con la esterificación ácida y la destilación de los AGL [42].

En el caso del agua, su presencia conlleva a hidrólisis, resultando en un alto contenido de AGL que conduce a la saponificación [42], afectando negativamente la conversión de biodiésel y pudiendo inhibir completamente la reacción de transesterificación [41]. Para eliminar el alto contenido de agua se calienta la muestra sobre los 100 °C; a escala industrial se utiliza la destilación al vacío (0,05 bar). De igual forma, para retirar los sólidos en suspensión como fosfolípidos y otras impurezas se lavan con agua caliente o a una eliminación por centrifugación y filtración [42]. Además, se han implementado varios pre-tratamientos para la purificación del aceite antes de la transesterificación, tales como: inyección de vapor, cromatografía en columna, neutralización, evaporación de vacío de película y filtración al vacío [15].

- **Transesterificación.** Es una reacción catalizada de aceites vegetales en presencia de alcohol para producir biodiésel y glicerol, como subproducto. El proceso consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles, donde los triglicéridos del aceite se convierten en diglicéridos, estos a su vez, en monoglicéridos que se transforman finalmente en glicerol. En cada etapa de la reacción se produce un éster, tal que se generan tres moléculas de éster

de una molécula de triglicéridos [42]. Para lograr una reacción completa y una alta conversión a metil ésteres, se requiere una relación molar 3:1 de alcohol a triglicéridos, manteniendo un exceso de alcohol para que la reacción no se revierta, además de la presencia de un catalizador para mejorar la velocidad de la reacción [15]. Pueden utilizarse catalizadores homogéneos (e.g. ácidos y álcalis) y catalizadores heterogéneos (e.g. ácidos, álcalis y enzimas). Sin embargo, se ha demostrado que los procesos de transesterificación ácida y alcalina son más rápidos y tienen un costo menor que los procesos catalizados por enzimas [42].

Emplear catalizadores alcalinos tiene ciertas ventajas en el proceso de producción según Lombana et al. [44]: disminución de su complejidad al necesitar condiciones de operación menos exigentes que cuando se usan catalizadores ácidos, requieren concentraciones bajas (0,5 a 1% p/p) para lograr altos rendimientos de alquilesteres (94 a 99%); tiempos de reacción cortos (menos de 1 hora) y bajo exceso de alcohol y condiciones de temperatura y presión moderadas (cerca al punto de ebullición del alcohol empleado). El hidróxido de sodio y potasio son los catalizadores alcalinos más utilizados a escala industrial por su mayor disponibilidad, bajo costo y facilidad de manejo [41]; sin embargo, el uso de este tipo de catalizadores es difícil cuando el contenido de AGL en la materia prima es muy alto [42]; aunque la elevada acidez del aceite se puede contrarrestar agregando un exceso de catalizador [41].

Por todo lo mencionado, para lograr altos rendimientos con este tipo de catalizadores se deben utilizar materias primas con un contenido de humedad menor al 0,05% y contenido de AGL menor al 0,5% [41]. Si no se cumplen estas condiciones, se recomienda la transesterificación en dos etapas, manejando por separado catalizadores ácidos y alcalinos. La primera etapa consiste en una catálisis con ácido sulfúrico o sulfato férrico para llevar a cabo la esterificación de los ácidos grasos, mientras que en la segunda etapa se emplea un catalizador alcalino para la transesterificación de los triglicéridos, teniendo en cuenta que los catalizadores deben eliminarse después de cada etapa. En otras investigaciones se ha realizado primero una catálisis alcalina seguida de una catálisis ácida obteniendo una reducción del tiempo del proceso y de la concentración del catalizador [42].

En la catálisis enzimática, la utilización de biocatalizadores tiene ventajas sobre los catalizadores mencionados, ya que son más selectivos, biodegradables, menos tóxicos y reaccionan a temperaturas menores [41]. Las lipasas son las enzimas más utilizadas en la producción de biodiésel de AFR ya que convierten todos los ácidos grasos en metil ésteres de ácidos grasos. Además, cuando se usan en el proceso de transesterificación, el glicerol y el biodiésel pueden ser recuperados fácilmente y con bajo nivel de impurezas; además, el contenido de humedad en el AFR es tolerado por la lipasa, resultando en conversiones altas de biodiésel a bajas condiciones de temperatura y presión en la reacción [42].

Sin embargo, el biocatalizador tiene limitaciones cuando entra en contacto con una gran cantidad de alcohol, ya que los centros activos de las lipasas lo admiten como sustrato, ocasionando pérdida en su actividad catalítica. Se ha reportado que la presencia de fosfolípidos en la materia prima y ciertos restos de glicerina, formados a medida que transcurre el proceso, son causantes de la desactivación de la enzima [41]. De igual forma, en la catálisis enzimática, las altas temperaturas afectan el proceso, al punto de desnaturalizar la enzima, siendo el rango de temperatura recomendado entre 35-50 °C [46]. En cuanto al tiempo de reacción debe ser mayor, comparado con la catálisis química, para poder alcanzar altos rendimientos de *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME). Chen et al. [47] obtuvieron porcentajes de conversión entre 88 y 90% al utilizar AFR y lipasa *R. Orzyae* inmovilizada, como biocatalizador, en una concentración del 30% (p/p) con un tiempo de reacción de 7 horas. Otra investigación, alcanzó una conversión de 97,8%, utilizó concentraciones entre 12 y 15% (p/p) de la enzima comercial *Novozym 435*, con porcentajes de mezcla de AFR de 50% con aceite de canola en un tiempo de reacción de 12 horas [48].

- **Purificación.** Luego de la reacción de conversión del AFR, es posible encontrar tri, di y monoglicéridos sin reaccionar, metanol, restos del catalizador, glicerina, agua y jabón [44]. En la mayoría de los casos se realiza una separación de las fases por decantación. Sin embargo, las impurezas en la materia prima pueden provocar la formación de emulsiones que interfieren en la separación, siendo necesaria la aplicación de sal saturada (cloruro de sodio) o centrifugación para romper tales emulsiones y lograr la separación [15]. Si el biodiésel se obtiene por catálisis ácida o alcalina, el catalizador sin reaccionar se neutraliza utilizando, por lo general, ácido fosfórico, produciendo sales de fosfato que son retiradas del biodiésel y que pueden ser aprovechadas como fertilizantes [9]; aun así, el biodiésel tiene impurezas que no pudieron eliminarse, tales como alcohol en exceso, el proceso más utilizado para su remoción es la evaporación, seguida de la destilación al vacío para eliminar los demás residuos.

El biodiésel se lava con agua a diferentes temperaturas, finalizando cuando ésta sea neutra, luego el biodiésel se seca por calentamiento, siendo común alcanzar los 110 °C en un recipiente abierto, hasta que no se detecte vapor de agua [15]. También se usan ciertos productos químicos, como el silicato de magnesio en polvo (i.e. Magnesol®), el lavado en seco con este producto reemplaza la utilización de agua y tiene la ventaja de servir como fertilizante orgánico posterior a su uso [49]. Esta etapa de lavado en seco utiliza 2% de silicato de magnesio a una temperatura de 100 °C, por 20 min, con una velocidad de agitación de 160 rpm [9]. Posterior a la purificación del biodiésel se realiza el acondicionamiento del glicerol obtenido, utilizando ácido fosfórico, que reacciona con el catalizador

alcalino residual y los jabones que se formaron durante el proceso de transesterificación. Como resultado se generan ácidos grasos, fosfatos o sales y glicerina que debe ser purificada antes de comercializarse. Durante este proceso se elimina el agua y el alcohol por medio de una destilación al vacío para obtener la glicerina concentrada al 85% o superior [44].

2.4 Propiedades de calidad del biodiésel obtenido

En la Tabla 2 se muestra la comparación de algunos parámetros de calidad del biodiésel obtenido en diferentes investigaciones a partir de aceites vegetales refinados o usados [9], [29], [32], los cuales deben cumplir con la normatividad nacional (i.e. Resolución 9-0963 de 2014), para su comercialización y uso automotriz. Esta norma se basa en métodos de ensayo de las normas de la Asociación Americana de Ensayo de Materiales (ASTM), Normas Europeas (EN) y las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO).

Tabla 2. Análisis comparativo del biodiésel a partir de diferentes materias primas

Parámetro	Aceite de cocina [50]	Aceite de palma [9]	Aceite de fritura [51]	Resolución 9-0963/2014 [33]
Viscosidad (mm ² /s)	4,89	4,59	4,44	1,9 – 6,0
Densidad (kg/m ³)	810	875	896	860 – 900
Contenido de humedad (mg/kg)	110	530	500	500 máx.
Número ácido (mgKOH/g)	0,06	0,89	0,38	0,5 máx.
Contenido de ésteres (% en masa)	98,45	99,40	88,90	96,5 mín.
Monoglicéridos (% en masa)	0,75	0,76	3,59	0,80 máx.
Diglicéridos (% en masa)	0,15	0,07	0	0,20 máx.
Triglicéridos (% en masa)	0,10	0,32	0	0,20 máx.
Glicerina total (% en masa)	0,01	0,22	-	0,25 máx.

La viscosidad del biodiésel es el principal problema para el uso de los aceites vegetales refinados o usados y las grasas animales en motores de combustión interna, ya que la alta viscosidad reduce significativamente la fluidez del combustible dentro del motor [50], [51]. Al respecto, la Resolución 9-0963 de 2014 establece un rango entre 1,9 y 6,0 mm²/s para este parámetro. Los estudios de la Tabla 2 correspondientes al AFR cumplen con este requerimiento, al igual que el biodiésel proveniente del aceite de palma. La densidad puede ocasionar problemas de combustión (i.e. retrasos en la inyección y deterioro del rendimiento del motor) cuando su valor no está acorde con los establecidos en la misma norma [52]. Todos los estudios mostrados cumplen con las especificaciones para este parámetro.

El contenido de agua es otro factor importante para la calidad del biodiésel ya que una humedad elevada puede favorecer el crecimiento microbiano, causar corrosión, formar emulsiones y estimular la hidrólisis de ésteres [50], [53]. Así, la Norma ASTM D6751, EN 14214 y la Resolución 9-0963 de 2014 establecen un límite máximo de 0,05% o 500 mg/kg para este parámetro. En los estudios mostrados en la Tabla 2, el biodiésel obtenido del aceite de palma crudo es el único que no cumple con dicho límite, por tal motivo, la etapa de lavado del biodiésel requiere una mayor atención y mejora [9]. Además, un alto valor del número ácido del biodiésel puede causar la degradación de ciertas piezas de goma y el taponamiento de los filtros [51], tal que este parámetro es útil para controlar la degradación del biocombustible durante el almacenamiento [53]; el biodiésel producido por AFR tiene un valor inferior al máximo exigido, al contrario del biodiésel a partir de aceite de palma que presenta un valor superior, esta situación se puede mejorar controlando los procesos de transesterificación, limpieza y secado [51].

El rendimiento del biodiésel depende principalmente del contenido de ésteres, en la norma EN 14103 se establece un valor mínimo de 96,5% (p/p) [54]. Este porcentaje está relacionado con la materia prima y con el proceso de transesterificación utilizado, valores inferiores al exigido en la norma indican que la reacción fue incompleta y el aceite no convertido en biodiésel provoca una alta viscosidad, combustión ineficiente, disminución del efecto *spray* y aumento en la carbonilla [55]. El biodiésel producido a partir de aceite de palma por transesterificación química cumple con lo exigido por la Resolución 9-0963 de 2014, al reportar un 99,4% de contenido de ésteres [9]. Mientras que en el caso del AFR, sólo un estudio cumple con el mínimo exigido en la norma, al reportar un 98,4% de contenido de ésteres [32].

Por otra parte, en la Figura 6 se presenta un análisis comparativo del contenido de ésteres de investigaciones que utilizaron diferentes materias primas para producir biodiésel por medios químicos y enzimáticos. De los trabajos que utilizaron AFR, una muestra de biodiésel alcanzó el rango exigido por la norma [33], y dos muestras no cumplieron con el porcentaje mínimo exigido. Así, el estudio de catálisis alcalina con etanol presentó el contenido de ésteres más bajo, 88,9% [29], en comparación con el que utilizó metanol, con 92% de ésteres [54]. El biodiésel producido por catálisis enzimática a partir de AFR, obtuvo un porcentaje de conversión de ésteres mayor al 90% [47], pero sólo uno supera el valor mínimo exigido en la norma, con un 97,8% de ésteres utilizando la enzima inmovilizada *Novozym 435* en un medio anhidro con largos tiempos de reacción, siendo la materia prima utilizada una mezcla de AFR con aceite de canola [48].

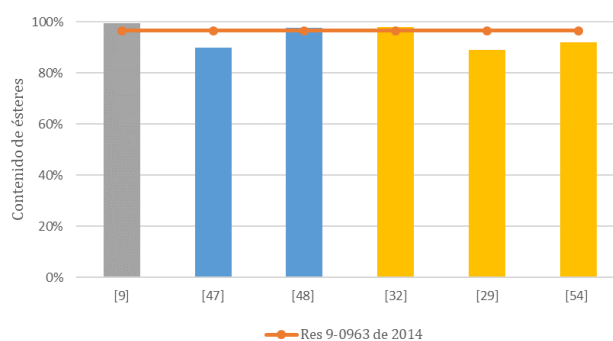


Figura 6. Análisis del rendimiento del biodiésel

3. IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DE AFR EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

La evaluación del efecto ambiental del uso del AFR como base para la producción de vectores de energía puede verse desde dos dimensiones. Desde el lado de la materia prima, destinar un porcentaje significativo de la generación anual estimada de AFR en Colombia, representa un aprovechamiento sostenible y amigable ambientalmente de este residuo, evitando su vertimiento a las redes de aguas residuales públicas e incluso directamente a las fuentes hídricas, tal como sucede actualmente. Se ha estimado que cada litro de AFR que se arroje a las fuentes de agua ocasiona la contaminación de 1000 litros de agua [16]. Considerando los volúmenes de AFR generados en el país (60 MM anuales), el impacto ambiental negativo es de grandes proporciones y evitarlo en lo posible constituye una acción mitigadora.

Si se analiza el impacto desde el lado del producto, el biodiésel tiene varios beneficios como vector de energía: puede ser un potencial sustituto de los combustibles fósiles, su uso genera menor contaminación atmosférica y puede ser producido a partir de diferentes materias [9], [56], [57]. Sin embargo, también presenta desventajas, la primera es inherente al biodiésel de primera generación, cuya producción puede alterar el espacio vital de los paisajes tradicionales y las plantaciones agrícolas, cuando los cultivos destinados para la alimentación se transforman en plantaciones de cultivos energéticos [58], lo cual conlleva una posible reducción del suministro de aceite de palma, soya, trigo y otras especies agrícolas, derivando en un aumento en el costo de los alimentos obtenidos de su transformación [59]. En este escenario, la producción de biodiésel a partir de materias primas que no compitan con los alimentos, como el AFR, resulta en una opción favorable para la producción de biocombustibles de segunda generación.

En cuanto a los beneficios ambientales del uso de los biocombustibles, tales como el etanol y el biodiésel, se encuentra la reducción de las emisiones de GEI en un 12 y 41 %, respectivamente, en relación con los combustibles [58], [60]. Así, Nabi et al. [61] y Sundus et al. [62] obtienen que las emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) disminuyen al utilizar mezclas de biodiésel-diésel, debido al contenido de oxígeno en el biodiésel (11%) y al aumento de la velocidad del motor durante la combustión. De igual forma, Zhang et al. [63] demuestran que las emisiones de CO disminuyen en un 30% al utilizar una mezcla B25 (i.e. 25% biodiésel-75% diésel, p/p), relacionado con el aumento en la cantidad de ésteres metílicos en ella.

Rojas et al. [64] encuentran que el consumo específico del combustible se reduce al usar mezclas de biodiésel provenientes de fuentes vegetales diferentes al aceite de palma, con el diésel convencional, reportando un menor consumo de éste en las mezclas D80/H20 (80% diésel con 20% biodiésel a partir de aceite de higuera) y D80/P10/AFU10 (80% diésel con 10% de biodiésel a partir de aceite de palma y 10% de biodiésel a partir de aceite de fritura usado). De igual forma, se evidencia que el uso de ésta última mezcla junto con la D80/AFU10/P5/H5 (80% diésel, 10% biodiésel de aceite de fritura usado, 5% biodiésel de aceite de palma, 5% biodiésel de aceite de higuera) aumentaron la producción de CO₂ y disminuyeron la producción de CO. Respecto a la composición de los gases de combustión, Flórez y Rojas [65] evidenciaron que la mezcla de diésel en un 70% junto con el biodiésel producido por aceite de palma (7,5%), higuera (7,5%) y aceite de fritura usado (15%) presenta una mejor combustión que la mezcla B30 (Diésel 70%, Biodiésel de aceite palma 30%) puesto que muestra un aumento en la producción de CO₂ y una gran disminución en el CO. Finalmente, en varios estudios se señala que el uso de biocombustibles reduce considerablemente las emisiones de material particulado (MP), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x), en comparación con el diésel convencional [58], [66], [67].

Con el fin de identificar el impacto del biodiésel a partir de AFR en el aire, en la Figura 7 se muestra el estudio de Ramírez [68], en el cual se evaluaron las emisiones de CO, NO_x y dióxido de azufre (SO₂) generadas al usar diferentes mezclas de biodiésel-diésel, en un motor diésel de cuatro cilindros y 1600 cc operando a una velocidad de 2000 rpm y con el biodiésel obtenido del AFR. En cuanto al CO, se puede apreciar que su concentración disminuye en 14 ppm al utilizar una mezcla B100 (i.e. 100% biodiésel) con respecto a la mezcla B0 (i.e. 0% biodiésel - 100% diésel), lo cual se debe a la calidad del biodiésel, porque un alto contenido de ésteres disminuye la generación de CO [69].

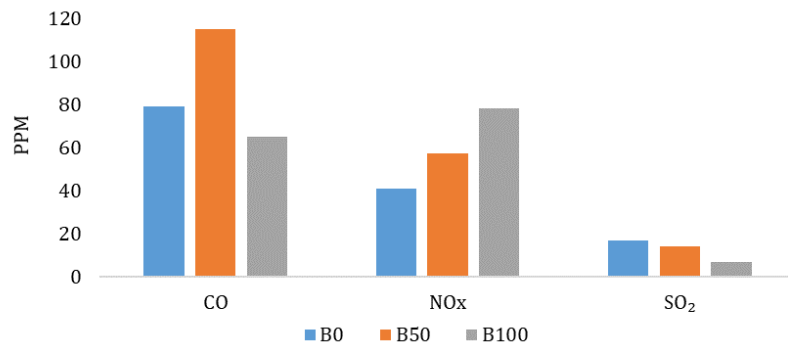


Figura 7. Emisión de gases por mezcla de biodiésel-diésel [68]

Por su parte, las emisiones de NO_x aumentan con el uso de biodiésel (B100) comparado con el diésel puro (B0). Este resultado es acorde con la literatura, que indica que el uso de biodiésel genera mayores emisiones de NO_x, a pesar de su alto índice de cetano [70], [71], debido a que las emisiones de NO_x en los combustibles se deben a la presencia de oxígeno en su estructura molecular o a un alto grado de insaturación en el biodiésel [61]. Este oxígeno mejora la oxidación del combustible durante la combustión, lo cual resulta en mayores temperaturas locales, generando un aumento en las emisiones de NO_x por un mecanismo de formación térmica [70], [72], [73].

Respecto a las emisiones de SO₂, disminuyen cuando aumenta el porcentaje de biodiésel en la mezcla, con un valor mínimo (i.e. 7 ppm) para el biodiésel puro (B100), a diferencia del diésel puro que generó 17 ppm. Sin embargo, Ramírez [68] asegura que la presencia de SO₂ en estas mezclas no es de esperarse, ya que se asume que el biodiésel tiene un bajo contenido de azufre, pero podría verse afectado por la fritura de los alimentos en el aceite. De igual forma, Peñaloza et al. [74] afirman que las emisiones de SO₂ estimadas para mezclas de combustibles, dependen principalmente del contenido de azufre en el combustible, y a medida que los combustibles fósiles o biocombustibles tengan menores cantidades de azufre se disminuyen las emisiones de SO₂ [75].

4. CONCLUSIONES

El aceite de fritura residual constituye una materia prima promisoría para la producción de biodiésel de segunda generación en Colombia por sus altos volúmenes generados anualmente, que se vierten a la red de alcantarillado, contaminando las aguas superficiales, o alterándolos químicamente y vendiéndolos ilegalmente como aceite virgen, poniendo en riesgo la salud humana. El AFR está compuesto en un 80% por ácido oleico y palmítico, en una proporción similar al del aceite de palma, principal materia prima para la producción de biodiésel en Colombia. La producción de biodiésel por transesterificación química en presencia de un catalizador alcalino tiene el mejor rendimiento, según su contenido de ésteres (98,4%), y cumpliendo con la Resolución 9-0963 de 2014, al igual que otros parámetros de calidad, como la viscosidad, densidad, contenido de agua, número ácido y glicerina total. Su bajo contenido de humedad (0,05%) es atribuible a los procesos térmicos de fritura; aunque tiene un alto índice de acidez (5,1 mgKOH/g) afectando el rendimiento en la transesterificación y que requiere un proceso de esterificación previo.

Ambientalmente, el biodiésel a partir de AFR evita la contaminación de los cuerpos de agua por la inadecuada disposición del aceite usado. Por su parte, el suelo no se erosiona ni se producen cambios en su uso. El impacto más significativo está en el recurso aire, al reducir las emisiones de CO y SO₂ en un 17,7% y 58,8%, respectivamente; aunque existe un leve aumento en las emisiones de NO_x, respecto al diésel convencional, debido a la presencia de oxígeno en su estructura molecular o a un alto grado de insaturación. Se concluye que el uso del AFR como materia prima para la producción de biodiésel constituye una solución sostenible y amigable ambientalmente a un problema multidimensional y que requiere de acciones similares.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency [IEA], "Colombia: Indicators for 2015", 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/statistics/?country=COLOMBIA&year=2016&category=Key%20indicators&indicator=TotCO2&mode=chart&categoryBrowse=false&dataTable=INDICATORS&showDataTable=true> [Accedido: May 14, 2019].
- [2] U.S. Energy Information Administration, "Monthly Energy Review October 2017", 2017. [En línea]. Disponible en: <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/stefanowicz1/docs/mer-oct17.pdf> [Accedido: May 14, 2019].
- [3] F. Orecchini, "The era of energy vectors," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, no. 14, pp. 1951-1954, 2006.
- [4] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century – REN21. "Renewables 2017 Global Status Report, 2017", [En línea]. Disponible en: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf [Accedido: May 14, 2019].
- [5] A. G. Dávila, "Evaluación de las condiciones de cultivo autotrófico de microalgas chlorella para la producción de biodiésel," Tesis de grado, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador, 2013.
- [6] J. C. Solarte, Y. Chacón y C. Cardona, "Evaluation of biogas and syngas as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as raw material," *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 33, pp. 52-62, 2018.

- [7] M. A. Hernández y J. A. Hernández, "Verdades y mitos de los biocombustibles", *Elementos Cien. y Cult.*, vol. 15, no. 71, pp. 15-18, 2008. [En línea]. Disponible: <http://www.redalyc.org/pdf/294/29407102.pdf> [Accedido: May 14, 2019].
- [8] F. Serna, L. Barrera y H. Montiel, "Impacto social y económico en el uso de biocombustibles", *Journal of Technology Management & Innovation*, vol. 6, no. 1, pp. 100-114, 2011. doi: 10.4067/S0718-27242011000100009.
- [9] J. C. Acevedo *et al.*, "Analysis of operating costs for producing biodiésel from palm oil at pilot-scale in Colombia," *Bioresource Technology*, vol. 188, pp. 117-123, 2015. doi: 10.1016/j.biortech.2015.01.071.
- [10] Departamento Nacional de Planeación, "Documento CONPES 3510", 2008. [En línea]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2008/conpes_3510_2008_.pdf [Accedido: May 14, 2019].
- [11] Consorcio CUE, "Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia", 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/files/EvaluacionDelCicloDeVidaDeLaCadenaDeProduccionDeBiocombustiblesEnColombia-MarcelGauch.pdf> [Accedido: May 14, 2019].
- [12] Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, "Cifras Informativas del Sector Biocombustibles - Biodiésel", 2018. [En línea]. Disponible en: <http://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-488.htm> [Accedido: May 14, 2019].
- [13] A. Z. Abdullah *et al.*, "Current status and policies on biodiésel industry in Malaysia as the world's leading producer of palm oil," *Energy Policy*, vol. 37, no. 12, pp. 5440-5448, 2009. doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.012.
- [14] Food and Agricultural Organization of the United Nations, "Solar energy: power for rural development", 2000. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/NEWS/2000/001003-e.htm>. [Accedido: May 14, 2019].
- [15] C. C. Enweremadu y M. M. Mbarawa, "Technical aspects of production and analysis of biodiésel from used cooking oil - A review", *Renew. and Sust. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 2205-2224, 2009. doi: 10.1016/j.rser.2009.06.007.
- [16] Revista Semana Sostenible, "¿Cómo y Por qué Deshacerse del Aceite de Cocina Usado?", 2017. [En línea]. Disponible en: <https://sostenibilidad.semana.com/impacto/articulo/aceite-de-cocina-usado-como-botarlo-y-reciclarlo-en-colombia/38474>. [Accedido: May 14, 2019].
- [17] M. A. Kalam *et al.*, "Emission and performance characteristics of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste cooking oil," *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 397-402, 2011. doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.026.
- [18] T. Thamsiriroj y J. D. Murphy, "How much of the target for biofuels can be met by biodiésel generated from residues in Ireland?," *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3579-3589, 2010. doi: 10.1016/j.fuel.2010.06.009.
- [19] M. J. Nye *et al.*, "Conversion of used frying oils to diesel fuel by transesterification: preliminary tests," *J Am Chem Soc.*, vol. 60, no. 8, pp. 1598-1601, 1983. doi: 10.1007/BF02666593.
- [20] M. Mittelbach y C. Remschmidt, *Biodiésel: the comprehensive handbook*. Graz, Austria: Martin Mittelbach, 2005, pp. 123-128.
- [21] W. T. Tsai, C. C. Lin y C. W. Yeh, "An analysis of biodiésel fuel from waste edible oil in Taiwan," *Renew Sustain Energy Rev.*, vol. 11, no. 5, pp. 838-857, 2007. doi: 10.1016/j.rser.2005.05.005.
- [22] S. Garrido, "Producción de biodiésel a partir de aceites usados," *Iconos. Revista de Ciencias Sociales*, vol. 37, pp. 75-86, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50918216006>. [Accedido: May 14, 2019].
- [23] M. J. Montefrío y J. P. Obbard, "The economics of biodiésel derived from waste cooking oil in the Philippines," *Energy Sources Part B*, vol. 5, no. 4, pp. 337-347, 2010. doi: 10.1080/15567240802532908.
- [24] J. Giraol *et al.*, "Reduction in ecological cost through biofuel production from cooking oils: an ecological solution for the city of Campinas, Brazil," *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 12, 1324-1329, 2011. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.02.015.
- [25] P. Kumaran *et al.*, "Technical feasibility studies for Langkawi WCO (waste cooking oil) derived-biodiésel," *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1386-1393, 2011. doi: 10.1016/j.energy.2011.02.002.
- [26] Y. Zhang *et al.*, "Analysing the status, obstacles y recommendations for WCOs of restaurants as biodiésel feedstocks in China from supply chain' perspectives," *Resour Conserv Recycl.*, vol. 60, pp. 20-37, 2012. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.11.014.
- [27] H. Zhang, Q. Wang y S. Mortimer, "Waste cooking oil as an energy resource: review of Chinese policies," *Renew Sustain Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 5225-5231, 2012. doi: 10.1016/j.rser.2012.05.008.
- [28] S. Sáenz *et al.*, "Oportunidad de negocio en el sector de los biocombustibles en Colombia mediante la transformación de aceite vegetal usado", Tesis de especialización, Universidad EAN, Bogotá, Colombia, 2014.
- [29] E. A. Bulla, F. E. Sierra, y C. A. Guerrero, "Producción de biodiésel usando aceites residuales de fritura y etanol por catálisis alcalina," *Ingeniería solidaria*, vol. 10, no. 17, pp. 61-69, 2014. doi:10.16925/in.v9i17.806
- [30] J. Dávila y C. Cortés, "Obtención de biodiésel a partir del aceite de fritura", Tesis de pregrado, Universidad Libre de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017.
- [31] R. Alarcón, "Obtención de biodiésel a partir de mezclas de aceite usado de cocina y aceite de palma", Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, 2014.
- [32] A. Bouaid, "Effect of free fatty acids contents on biodiésel quality. Pilot plant studies," *Fuel*, vol. 174, pp. 54-62, 2016. doi: 10.1016/j.fuel.2016.01.018
- [33] Ministerio de Minas y Energía y del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 9-0963 de 2014, Bogotá D.C, Colombia, 2014.
- [34] Corporación Aceites Usados - ACR Corp., "Informe de aceites usados 2011", 2011. [En línea]. Disponible en: <https://accrcorp.files.wordpress.com/2010/07/resumen-ejecutivo-2011.pdf> [Accedido: May 14, 2019].
- [35] J. Echevarría, "El desarrollo sostenible y el reciclaje del aceite usado de cocina a la luz de la jurisprudencia y el ordenamiento jurídico colombiano," *Producción + Limpia*, vol. 7, no. 1, pp. 109-122, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/249/119>. [Accedido: May 14, 2019].
- [36] Revista Dinero, "El aceite usado puede convertirse en el próximo biocombustible", 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.dinero.com/empresas/articulo/el-aceite-usado-puede-convertirse-proximo-biocombustible/217180>. [Accedido: May 14, 2019].
- [37] Proyecto de Ley No. 08 de 2016. Congreso de Colombia. Bogotá D.C, Colombia.
- [38] M Ayala, "Evaluación de la calidad del aceite de mezclas vegetales utilizado en doce frituras sucesivas empleado para freír plátano hartón verde", Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2011
- [39] A Yagüe "Estudio de utilización de aceites para fritura en establecimientos alimentarios de comidas preparadas", Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, 2003. [En línea] Disponible en: <https://avdiaz.files.wordpress.com/2008/08/mangeles-aylon-blog.pdf> [Accedido: May 14, 2019].

- [40] Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite [FEDEPALMA], "¿Hay riesgos para la salud al consumir aceites reutilizados?", 2010. [En línea] Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/viewFile/9529/9520> [Accedido: May 14, 2019].
- [41] P. N. Benjumea, J. R. Agudelo y L. A. Ríos, "Biodiésel: Producción, calidad y caracterización". Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquía y Grupo de Manejo Eficiente de la Energía, 2009.
- [42] Z. Yaakob *et al.*, "Overview of the production of biodiésel from Waste cooking oil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 184 – 193, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2012.10.016
- [43] N. Pérez, y J. Uribe, "Determinación de las condiciones óptimas para la producción de biodiésel a partir de aceite de higuera (*ricinus communis*) y aceite de palma milpesos (*oenocarpus bataua*)", Tesis de pregrado, Univ. EAFIT, Medellín, Colombia, 2008.
- [44] J. Lombana *et al.*, "Análisis del sector de biodiésel en Colombia y su cadena de suministro". Barranquilla, Colombia: Editorial Universidad del Norte, 2015.
- [45] A. Talebian, N. A. Saidina y H. Mazaheri, "A review on novel processes of biodiésel production from waste cooking oil," *Applied Energy*, vol. 104, pp. 683–710, 2013. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.061
- [46] A. F. Rojas, E. Girón, y H. G. Torres, "Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión - catálisis enzimática," *Ingeniería e Investigación*, vol. 30, no. 1, pp. 17–21, 2010.
- [47] G. Chen, M. Ying y W. Li, "Enzymatic conversion of waste cooking oils into alternative fuel—biodiésel," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 129-132, pp. 911-921, 2006. doi.org/10.1385/ABAB:132:1:911
- [48] L. Azócar, "Proceso enzimático para la producción de metil ésteres de ácidos grasos utilizando aceites residuales de fritura en mezcla con aceite de raps como materia prima", Disertación PhD, Univ. de la Frontera, Temuco, Chile, 2011.
- [49] M. Berrios y R. L. Skelton, "Comparison of purification methods for biodiésel", *Chem. Eng. J.*, vol. 144, no. 3, pp. 459–465, 2008. doi.org/10.1016/j.cej.2008.07.019
- [50] E. A. Canesin, "Characterization of residual oils for biodiésel production," *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 17, pp. 39-45, 2014. doi: 10.1016/j.ejbt.2013.12.007
- [51] A. B. Chhetri, K. C. Watts y M. R. Islam, "Waste cooking oil as an alternate feedstock for biodiésel production", *Energies*, vol. 1, pp. 3-18, 2008. doi: 10.3390/en1010003
- [52] D. E. Arias, C. A. Teuta y J. Parra, "Caracterización de las propiedades del biodiésel de girasol bajo la Norma NTC de 100/04 y medición de poder calorífico," *AVANCES Investigación en Ingeniería*, vol. 8, n° 2, pp. 73-80, 2011.
- [53] X. Fan, R. Burton y G. Austic, "Preparation and characterization of biodiésel produced from recycled canola oil," *The Open Fuels & Energy Science Journal*, vol. 2, pp. 113-118, 2009. doi: 10.2174/1876973X01002010113.
- [54] A. Phan y T. Phan, "Biodiésel production from waste cooking oils," *Fuel*, vol. 87, pp. 3490-3496, 2008. doi: 10.1016/j.fuel.2008.07.008
- [55] Centro Multidisciplinar de Innovación y Tecnología de Navarra – CEMITEC, "Análisis y caracterización de biodiésel", 2005. [En línea]. Disponible en: <http://www.biodiéselspain.com/articulos/caracterizacion.pdf>. [Accedido: May 14, 2019].
- [56] L. G. Schumacher *et al.*, "Biodiésel emissions data from Series 60 DDC engines", *Trans. ASAE*, Vol. 44, n° 6, pp. 1465–1468, Ene. 2001. doi: 10.13031/2013.6999
- [57] M.S. Graboski y R.L. McCormick, "Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines," *Prog. Energy Combust. Sci.* vol. 24, n° 2, pp. 125–164, 1998. doi: 10.1016/S0360-1285(97)00034-8
- [58] M.M. Hasan y M.M. Rahman, "Performance and emission characteristics of biodiésel-diesel blend and environmental and economic impacts of biodiésel production: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 938-948, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.045.
- [59] M. Hajjari *et al.*, "A review on the prospects of sustainable biodiésel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiésel utilization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 445-464, 2017.
- [60] J. Hill *et al.*, "Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiésel and ethanol biofuels", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 103, no. 30, pp. 11206-11210, 2006. doi: 10.1073/pnas.0604600103.
- [61] N. Nabi *et al.*, "Reductions in diesel emissions including PM and PN emissions with diesel-biodiésel blends," *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, pp. 860-868, 2017. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.096.
- [62] F. Sundus, M. Fazal y H. Masjuki, "Tribology with biodiésel: A study on enhancing biodiésel stability and its fuel properties," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 399-412, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.217.
- [63] H. Zhang *et al.*, "Atmospheric impacts of black carbon emission reductions through the strategic use of biodiésel in California," *Science of the Total Environment*, vol. 538, pp. 412-422, 2015. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.08.030.
- [64] A. Rojas-González, O. Chaparro-Anaya y C. A. Ospina, "Evaluación de mezclas de biodiésel-diésel en la generación de energía eléctrica," *Revista Ingeniería y Universidad*, vol. 15, no. 2, pp. 319-336, 2011.
- [65] A. A. Flórez-Montoya y A. F. Rojas, "Efecto de la proporción de mezclas biodiésel/petrodiésel en el desempeño mecánico-ambiental de motores," *Revista Ingeniería y Competitividad*, vol. 11, no. 2, pp. 63-78, 2009.
- [66] C. Alejos *et al.*, "Ethylic or methylic route to soybean biodiésel? Tracking environmental answers through life cycle assessment," *Applied Energy*, vol. 184, pp. 1246-1263, 2016. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.017
- [67] M. D'Agosto *et al.*, "Comparative study of emissions from stationary engines using biodiésel made from soybean oil, palm oil and waste frying oil", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1376-1392, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.12.040
- [68] J. L. Ramírez, "Evaluación del uso de biodiésel obtenido a partir de aceite de cocina usado en un motor diésel," *El Hombre y la Máquina*, vol. 40, pp. 102-110, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47826850011> [Accedido: May 14, 2019].
- [69] A. Bueno *et al.*, "Performance and emissions characteristics of castor oil biodiésel fuel blends," *Applied Thermal Engineering*, vol. 125, pp. 559–566, 2017. doi: 10.1016/j.applthermaleng. 2017.06.114
- [70] N. Usta *et al.*, "Combustion of biodiésel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a Diesel engine," *Energy conversion and management*, vol. 46, no. 5, 741-755, 2005. doi: 10.1016/j.enconman.2004.05.001
- [71] A. N. Ozsezen y M. Çanakçı, "An investigation of the effect of methyl ester produced from waste frying oil on the performance and emissions of an IDI diesel engine," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 23, pp. 395-404, 2008.

- [72] J. Song, K *et al.*, "Effect of oxygenated fuel on combustion and emissions in a light-duty turbo diesel engine," *Energy Fuel*, vol. 16, no. 2, pp. 294-301, 2002. doi: 10.1021/ef010167t
- [73] B. Li *et al.*, "Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiésel/PODE blends," *Applied Energy*, vol. 206, pp. 425-431, 2017. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.206
- [74] A. Peñaloza *et al.*, "Predicción y análisis de emisiones de mezclas combustibles diésel/biodiésel modificadas con nanopartículas de alúmina y ácido oleico," *Revista ION*, vol. 30, no. 1, pp. 45-55, 2017.
- [75] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html> [Accedido: May 14, 2019].

Aplicación del método de balance de energía metal/molde para la determinación del calor latente de solidificación y la evolución de fracción sólida de una aleación Al-7.5%Si

Carlos González R.¹

Adrián M. Amaro V.²

Universidad Nacional Autónoma de México – México

En este trabajo se aplica el método de análisis de curvas de enfriamiento asistido por computador denominado Método de Balance de Energía Metal / Molde (MEM) a la aleación Al-7.5%Si con el propósito de determinar el calor latente de fusión y la ruta de solidificación que presenta esta aleación y comparar sus predicciones con respecto a los valores de calor latente reportados en la literatura. Para tal efecto se elaboró la aleación líquida en un crisol de carburo de silicio dentro de un horno eléctrico, a partir de una carga constituida de aluminio y silicio de pureza comercial, se controló su composición química mediante un espectrómetro de emisión por chispa y se emplearon moldes cilíndricos de acero inoxidable. Una vez preparados la aleación líquida y el molde, se transfirió la muestra de aleación líquida al molde y se obtuvieron, mediante termopares insertados en la muestra y en el molde metálico, conectados a un sistema de adquisición de datos, las curvas de enfriamiento de la aleación bajo estudio, inicialmente líquida y del molde metálico que la contiene, ambos de pesos conocidos y se aplicó el método, basado en balances de energía aplicados al sistema compuesto molde/metal. También se procesaron numéricamente las curvas de enfriamiento obtenidas para las muestras experimentales empleando dos de los métodos de análisis de curva de enfriamiento newtonianos más utilizados en la literatura con el propósito de comparar el desempeño del método MEM frente al de métodos convencionales en la determinación precisa de calor latente de solidificación y de la evolución de la fracción sólida. Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que para la aleación bajo estudio el método MEM presenta claramente un mejor desempeño en la determinación del calor latente de fusión y predice evoluciones de fracción sólida similares a las de los métodos newtonianos convencionales, por lo cual se puede afirmar que el método MEM muestra un muy buen potencial para ser empleado en el estudio de la solidificación de aleaciones.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de curvas de enfriamiento es una herramienta ampliamente utilizada para el control de la calidad metalúrgica en los procesos de producción de piezas por fundición de aleaciones ferrosas y no ferrosas. Lo anterior se debe a que los cambios de fase que se presentan durante el enfriamiento y solidificación de aleaciones metálicas es un proceso exotérmico por lo cual al liberarse el calor asociado con las transformaciones de fase, la evolución térmica de la aleación, es decir su cambio de temperatura conforme transcurre el tiempo muestra cambios perceptibles en la curva de enfriamiento, que es la evolución de la temperatura en función del tiempo, los cuales son más notorios en la primera derivada de la curva de enfriamiento con respecto al tiempo.

Estos cambios están directamente relacionados con el proceso de formación de microestructura lo cual ha sido empleado para controlar la calidad metalúrgica de productos de solidificación a partir del procesamiento de curvas de enfriamiento. Por ejemplo, en hierros colados, el análisis de curvas de enfriamiento se emplea para el control del carbono equivalente y de la morfología del grafito y en aleaciones base aluminio, se utiliza para el control del nivel de modificación del eutéctico Al-Si y del tamaño de grano [1-4].

El análisis de curvas de enfriamiento asistido por computador también ha sido empleado como una herramienta valiosa en el estudio y la comprensión de la solidificación de aleaciones a través de la caracterización de las rutas de solidificación, es decir la evolución de la fracción sólida en función de la temperatura y el tiempo, la determinación de calor latente de fusión, así como la identificación y cuantificación de los microconstituyentes formados durante este proceso [5, 6], aspecto muy relevante, ya que del tipo y cantidades relativas de microconstituyentes dependen las propiedades mecánicas, químicas y funcionales de la aleación obtenida.

Los métodos de análisis de curvas de enfriamiento se basan en el procesamiento numérico de la evolución de la temperatura de la muestra, medida con la ayuda de uno o dos termopares, insertados en ella y conectados a un sistema de adquisición de datos, en función del tiempo, cuando la muestra está inicialmente líquida y contenida dentro de un molde de características específicas, durante su proceso de enfriamiento y solidificación hasta la temperatura ambiente.

Existen dos tipos de métodos de análisis de curvas de enfriamiento en función del número de termopares introducidos dentro de la muestra: 1) Newtonianos [7, 8], que emplean la lectura de un termopar dentro de la muestra, y 2) análisis térmico de Fourier [9], que emplea dos termopares introducidos en dos posiciones radiales de la muestra. Por su simplicidad los métodos Newtonianos son los que han sido más aceptados y utilizados debido a una más fácil implementación experimental. Dentro de estos métodos destacan como más representativos los métodos basados en la generación de una curva de referencia cero y la integración, durante la solidificación, del área que existe entre la primera derivada y la curva cero, como por ejemplo el método de Newton de línea base lineal (NBL) [7] y el método de Newton de línea base dinámica (DBL) [8]. En ambos métodos se parte de la obtención de la curva de enfriamiento

¹ carlosgr@unam.mx

² adrian.amaro@unam.mx

de la muestra inicialmente líquida mediante un termopar colocado en el centro térmico de la muestra. Se genera la primera derivada de esta curva con respecto al tiempo y se identifican los puntos de inicio y fin de la solidificación.

A partir de este punto los métodos NBL y DBL difieren en la manera de generar la curva cero de referencia. En el método NBL se efectúa una interpolación exponencial entre los puntos de inicio y fin de solidificación para generar la curva cero en los mismos tiempos de adquisición que los presentes en la primera derivada. En el caso del método DBL, se grafica la primera derivada de la curva de enfriamiento en función de la temperatura cuando no hay cambio de fase, es decir antes y después de la solidificación y se hace un ajuste numérico que resulta en un polinomio generalmente de tercer grado, que describe la evolución de la velocidad de enfriamiento en función de la temperatura. Este polinomio es empleado para generar la curva cero empleando las temperaturas registradas en la curva de enfriamiento entre el tiempo de inicio y el tiempo de fin de la solidificación.

En ambos métodos una vez que se cuenta con la curva cero de referencia se efectúa la integración numérica del área existente entre la primera derivada y la curva cero. Esta área multiplicada por la capacidad calorífica proporciona el calor latente de fusión y la división del área presente entre ambas curvas desde el tiempo de inicio de solidificación hasta un tiempo t durante la solidificación, entre el área total, proporciona la fracción sólida a ese tiempo. La aplicación de todos estos métodos en aleaciones se realiza para predecir el calor latente de fusión y la ruta de solidificación, es decir la evolución de la fracción sólida en función de la temperatura y el tiempo. El problema con estos métodos es que predicen valores de calor latente de solidificación muy alejados de los valores reales determinados mediante la técnica de determinación de referencia que es la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

Hemos planteado [10] que el origen de este problema está relacionado con el hecho de que estos métodos no toman en cuenta el papel térmico que juega la presencia del molde que contiene a la muestra. Recientemente desarrollamos una nueva metodología [10] aplicable al procesamiento de curvas de enfriamiento de aleaciones, que toma en cuenta el papel térmico del molde, denominado Método de Balance de Energía Metal / Molde (MEM), para la determinación del calor latente de fusión y de la ruta de solidificación y aplicamos este método a una aleación Al-14%Cu encontrando que el método MEM presenta un mejor desempeño en la determinación del calor latente de solidificación y evoluciones de la fracción sólida similares al de los métodos newtonianos convencionales.

El propósito de este trabajo es el de aplicar el método MEM a la aleación Al-7.5%Si con el propósito de determinar el calor latente de fusión y la ruta de solidificación presente y comparar sus predicciones con respecto a los valores reportados en la literatura especializada. También se compararán las predicciones del método MEM con las determinaciones realizadas empleando los métodos Newtonianos convencionales NBL y DBL para confirmar si existen o no ventajas al aplicar este nuevo método con relación a los resultados obtenidos por los métodos convencionales estudiados.

2. MÉTODO

2.1 Método de Balance de Energía Metal/Molde (MEM)

El método de análisis de curva de enfriamiento asistido por computador ha sido denominado Método de Balance de Energía Metal/Molde (MEM). Este método analiza el proceso de enfriamiento de una muestra metálica de peso conocido, inicialmente líquida, que está contenida en un molde metálico cilíndrico también de peso conocido, aislado térmicamente en su tapa y en su base. El método MEM emplea el procesamiento numérico de las curvas de enfriamiento de la muestra y del molde que la contiene, junto con los datos de los pesos y las capacidades caloríficas de la muestra y del molde para determinar el calor latente de fusión y la evolución de la fracción sólida durante la solidificación. La descripción detallada del método puede ser encontrada en la referencia [10]. En resumen, el método supone que en el sistema compuesto metal/molde, tanto el molde metálico como el metal líquido ahí contenido, que constituye la muestra, comienzan su proceso de enfriamiento al mismo tiempo y de manera conjunta, y cuando no hay transformación de fase, el enfriamiento sigue un comportamiento newtoniano.

El enfriamiento del conjunto experimental metal/molde puede ser reproducido por el parámetro de enfriamiento CF el cual puede determinarse numéricamente en un paso de tiempo Δt a partir de la información experimental sobre la muestra metálica y el molde durante el proceso de enfriamiento cuando la muestra está completamente líquida o sólida (es decir, sin cambio de fase), representado por la ecuación (1).

$$CF = \frac{m_M C_{pM} \Delta T_M + m_{mo} C_{pmo} \Delta T_{mo}}{-(T_M - T_0) \Delta t} \quad (1)$$

En la ecuación (1) m es el peso (Kg), C_p (J/KgK) es la capacidad calorífica, Δt es el paso de tiempo (s) y ΔT (K) es el cambio de temperatura, usando el subíndice M para el metal y mo para el molde, CF (W/K) es el factor de enfriamiento, un coeficiente de enfriamiento cinético térmico que describe al enfriamiento del sistema compuesto, T_M (K) es la temperatura del metal y T_0 (K) es la temperatura ambiente.

Se pueden obtener mediante ajuste numérico, correlaciones que describen cómo cambia el coeficiente de enfriamiento cinético CF en función de la temperatura empleando la información generada del cambio en los valores de CF en función de la Temperatura, a partir de la información experimental y la ecuación (1). La disponibilidad de tales correlaciones permite obtener el calor latente de solidificación y la evolución de la fracción sólida empleando la integración numérica del calor latente instantáneo liberado por la muestra durante la solidificación.

Ya hemos mostrado en trabajos previos [10] el camino a seguir para obtener la evolución de la fracción sólida y la de la liberación del calor latente de solidificación partir de la determinación del calor latente liberado por la solidificación, que puede evaluarse empleando la ecuación (2), donde los superíndices t y t + Δt indican el valor actual y el valor futuro, respectivamente de las variables correspondientes temperatura T y fracción sólida Fs. El calor latente instantáneo liberado por la muestra Q_{Linst} (J) está dado por dicha ecuación.

$$Q_{Linst} = -m_M H_f (F_s^{t+\Delta t} - F_s^t) = -CF(T_M^{t+\Delta t} - T_o)\Delta t - m_{mo} C_{p_{mo}}(T_{mo}^{t+\Delta t} - T_{mo}^t) - m_M C_{p_M}(T_M^{t+\Delta t} - T_M^t) \quad (2)$$

El calor latente de fusión del metal Hf (J / kg) se puede obtener a partir de la ecuación (3), donde Q_{Ltot} (J) es el calor total liberado durante la solidificación y t_{is} y t_{fs} son los tiempos de inicio y fin de la solidificación.

$$\Delta H_f = \frac{Q_{Ltot}}{m_M} = \frac{1}{m_M} \sum_{t_{is}}^{t_{fs}} Q_{Linst} \quad (3)$$

La fracción sólida formada, durante la solidificación, en el tiempo t puede obtenerse de la ecuación (4).

$$F_s^t = \frac{1}{\Delta H_f \cdot m_M} \sum_{t_{is}}^t Q_{Linst} \quad (4)$$

2.2 Procedimiento Experimental

Para probar la capacidad del método MEM para determinar el calor latente y la evolución de la fracción sólida durante la solidificación, se eligió la aleación Al-7.5%Si por ser la base de una de las aleaciones más empleadas en la industria de la fundición y que por su importancia, se ha estudiado en el pasado, con propiedades termofísicas conocidas y disponibles en la literatura abierta. Para la preparación de la aleación se partió de aluminio y de silicio ambos de pureza comercial, la fusión se realizó en un horno eléctrico de resistencia empleando un crisol de carburo de silicio. Para verificar la composición química de la aleación líquida se empleó un espectrómetro de emisión por chispa y la temperatura del baño se controló empleando un termopar tipo K hasta obtener una temperatura adecuada para la extracción de las muestras de aleación líquida. La aleación líquida fue desgasificada con argón. La composición química de la aleación experimental se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición Química, en porcentaje en peso, de la aleación bajo estudio

Aleación	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Al
Al7Si	7.51	0.31	0.01	0.01	0.03	Resto

Se emplearon moldes metálicos cilíndricos, de acero inoxidable 316 con 3 cm de diámetro interno, 5 cm de altura interna y un espesor de pared de 0.5 cm. Los moldes fueron cubiertos con pintura de nitruro de boro y se calentaron en otro horno hasta temperaturas superiores a la temperatura establecida para la extracción de la aleación líquida, previamente a su inmersión en el baño metálico para la extracción de las muestras.

Cada molde metálico precalentado se llenó por inmersión con metal líquido contenido en el crisol de carburo de silicio. Luego, el molde metálico conteniendo a la aleación líquida se colocó en un dispositivo diseñado para la obtención de las curvas de enfriamiento. En este dispositivo se aisló térmicamente al molde conteniendo a la muestra líquida, en su tapa y en su base empleando placas térmicamente aislantes. En este dispositivo, y con el fin de registrar la historia térmica del metal y el molde durante el enfriamiento y la solidificación de la muestra, se introdujeron por su parte superior dos termopares tipo K dentro de tubos bifilares aislantes de alúmina con 0.15 cm de diámetro exterior.

El primer termopar se introdujo en el eje de simetría de la muestra, ubicando su punta desnuda a una profundidad correspondiente a la mitad de la altura interna del molde. El segundo termopar se introdujo perpendicular al canto de la pared lateral del molde a la misma altura. Los termopares fueron conectados a una tarjeta de adquisición de datos, conectada a la vez con una computadora personal portátil para recibir y almacenar las historias térmicas del metal y del molde para su posterior procesamiento numérico, utilizando los métodos empleados en este trabajo, buscando determinar el calor latente de solidificación y la evolución de la fracción sólida de la aleación bajo estudio.

La Tabla 2 muestra los datos termofísicos utilizados durante los cálculos y el valor reportado de entalpía de fusión de la aleación bajo estudio, utilizados como referencia y la Tabla 3 muestra los pesos de las muestras metálicas y moldes experimentales. Para procesar numéricamente las curvas de enfriamiento (Figura 1) mediante los métodos NBL y

DBL se siguieron los procedimientos descritos en las referencias [7] y [8] respectivamente. Con el fin de comparar mejor todos los métodos incluidos en este trabajo, los cálculos correspondientes a cada método se realizaron utilizando los mismos valores de capacidad calorífica durante la solidificación.

Tabla 2. Datos termofísicos tomados como referencia (H_f) y utilizados durante los cálculos (C_{pL} y C_{pS}) reportados en la literatura [11,12]. Los subíndices L y S indican aleación sólida y líquida respectivamente

Metal	H_f	C_{pS}	C_{pL}	Ref.
	J/ kg	J/kgK	J/kgK	
Al-7%Si	434400	1143	1074	[11]
Steel 316		456.1+0.2414T		[12]

Tabla 3. Pesos de las muestras y de los moldes metálicos empleados en los experimentos.

Muestra	Aleación Metálica (gr)	Molde (gr.)
M1	78.0	242.7
M2	82.0	243.2
M3	77.6	237.7

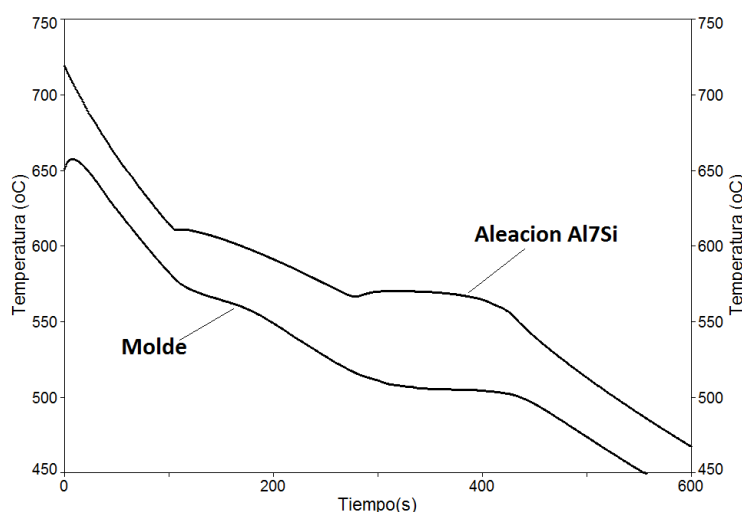


Figura 1. Curvas de enfriamiento de la aleación Al-7Si y molde metálico durante el proceso de enfriamiento de la muestra M1

3. RESULTADOS

3.1 Determinación del calor latente de fusión de la aleación Al-7.5%Si mediante el método MEM

La Figura 1 muestra las curvas de enfriamiento de la aleación y el molde bajo estudio típicamente obtenidos durante la experimentación. En todos los casos, las curvas de enfriamiento de la aleación muestran cuatro etapas de enfriamiento: una primera etapa de enfriamiento de la muestra líquida, donde la temperatura cae continuamente hasta el inicio de la segunda etapa cuando se alcanza la temperatura de liquidus de la aleación e inicia la solidificación de la fase primaria y en donde la temperatura de la aleación sigue bajando pero a una velocidad menor hasta alcanzar una tercera etapa, que corresponde a la solidificación del eutéctico en donde la temperatura se mantiene a una temperatura casi constante como resultado de la liberación de calor latente de este microconstituyente, y esta tendencia continúa hasta el final de la solidificación, cuando la liberación de calor latente se detiene y la temperatura del metal cae de nuevo continuamente, durante la cuarta y última etapa de enfriamiento de la muestra en estado sólido.

Se puede observar que existen diferencias entre las temperaturas instantáneas del metal y el molde, pero se puede constatar también una tendencia a mantener esta diferencia casi constante, durante la primera y última etapa, cuando no hay solidificación, y también se puede ver que la distancia entre curvas cambia para cada una de estas dos etapas y que, durante la solidificación del microconstituyente eutéctico la distancia entre curvas alcanza su valor más alto.

Para los tres conjuntos metal/molde analizados, se calculó la primera derivada de la curva de enfriamiento de la muestra con el propósito de identificar los tiempos de inicio, t_{is} y de fin t_{fs} de solidificación. Estos tiempos se obtuvieron mediante la aplicación de los criterios convencionales utilizados por el método NBL [7], que identifica el inicio de la solidificación como el punto donde la primera derivada aumenta repentinamente como resultado de la liberación de calor latente y el final de la solidificación, que es ubicado en el punto donde la primera derivada durante la solidificación se cruza con la extrapolación de la tendencia mostrada por la primera derivada después de la solidificación. La Figura 2 muestra un ejemplo gráfico de estas determinaciones en el caso de la muestra M1.

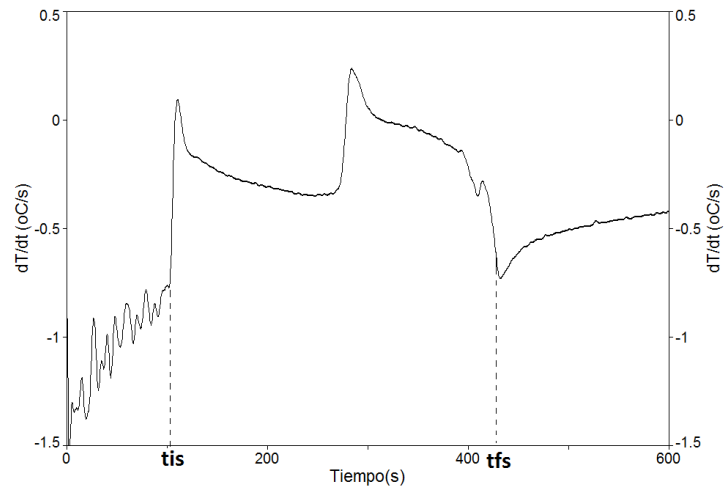


Figura 2. Primera derivada con respecto al tiempo de la curva de enfriamiento de la aleación Al-7%Si y determinación gráfica de los tiempos de inicio t_{is} y de fin t_{fs} de la solidificación para muestra M1

Posteriormente, para cada conjunto metal/molde, se calculó el coeficiente de enfriamiento cinético CF en función de la temperatura utilizando los pesos y las capacidades caloríficas conocidas de la muestra y del molde, así como la información térmica del metal y del molde en ausencia de cambio de fase. La Figura 3 muestra los valores generados de este parámetro en función de la temperatura, que se trataron mediante ajuste numérico para obtener una ecuación de CF en función de la temperatura para la muestra M1.

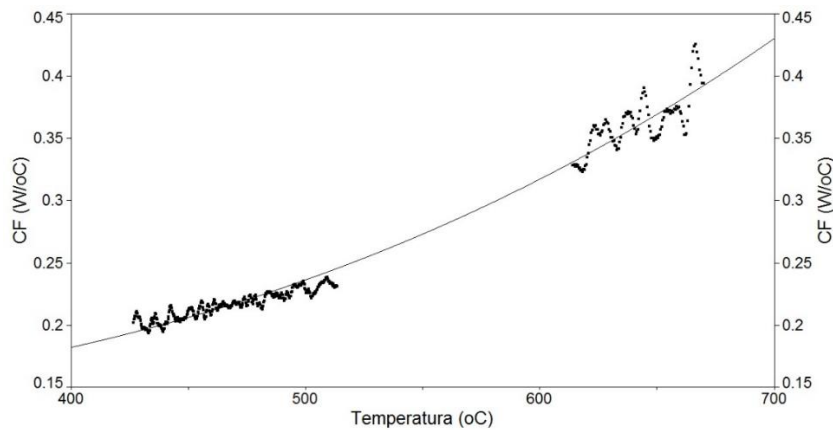


Figura 3. Puntos Generados de Cf vs Temperatura y línea de ajuste numérico de los valores Cf calculados para la muestra M1 en función de la temperatura, mediante la ecuación cubica $CF=0.1232+8.867e-10*(T^3)$

Una vez que se cuenta con las expresiones de CF en función de T_M el siguiente paso de la metodología fue obtener el calor latente instantáneo liberado por la muestra (Figura 4) durante la solidificación empleando la ecuación (2) y el calor latente de solidificación, empleando la ecuación (3). En todos los cálculos, el valor de capacidad calorífica utilizado para la aleación bajo estudio fue el valor promedio de las capacidades caloríficas del líquido y el metal sólido.

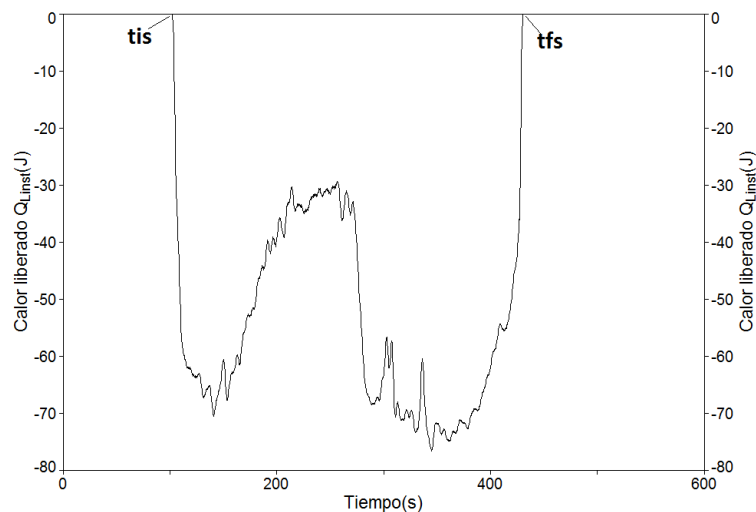


Figura 4. Calor latente instantáneo liberado en función del tiempo durante la solidificación de la muestra M1

La Figura 4 muestra el calor latente instantáneo liberado como una función del tiempo calculado aplicando el método MEM a las curvas experimentales de enfriamiento de la muestra M1. Se puede observar que la evolución del calor instantáneo liberado durante la solidificación cambia durante este proceso y muestra dos regiones principales, entre t_{is} y t_{Fs} , una primera región de izquierda a derecha, asociada con el calor latente liberado por la solidificación de la fase primaria y una segunda región correspondiente al calor liberado por la solidificación del eutéctico. Lo anterior sugiere que el calor liberado por la solidificación de cada uno de los dos microconstituyentes que se forman durante la solidificación de esta aleación inicia de una manera muy intensa, desde 0 hasta -70 Joules aproximadamente para la fase primaria y de -30 a -75 Joules para el eutéctico y va disminuyendo su intensidad conforme la solidificación continúa.

La integración de esta energía durante la solidificación proporciona el valor del calor liberado durante la transformación de fase, que dividido entre el peso de la muestra proporciona el valor determinado del calor latente de solidificación en J/Kg. La Tabla 4 muestra los valores determinados de calor latente de fusión para las tres muestras. Se puede constatar en esta Tabla que el método MEM determina valores de entalpía de fusión cercanos a los reportados en la literatura y determinados mediante DSC.

Tabla 4. Valores calculados de Entalpía de fusión para las muestras experimentales utilizando el método

Muestra	Hf (J/Kg)
M1	432143
M2	329390
M3	380939
Promedio	405405 +/- 63300
Valor de referencia	434400

3.2 Comparación de las predicciones de calor latente de fusión y evolución de fracción sólida para los métodos MEM, NBL y DBL

Los otros dos métodos considerados en este trabajo, NBL y DBL se aplicaron a las curvas experimentales de las tres muestras con el objetivo de comparar sus desempeños respecto a la predicción del calor latente de solidificación y de la evolución de la fracción sólida. Para realizar estos cálculos se utilizaron los mismos tiempos de inicio y fin de la solidificación, así como de capacidad calorífica empleados por el método MEM. En la Figura 5 se muestra la primera derivada con respecto al tiempo de la curva de enfriamiento de la muestra M1 junto las curvas cero de referencia calculadas por los procesamientos numéricos de esta curva empleando los métodos NBL y DBL.

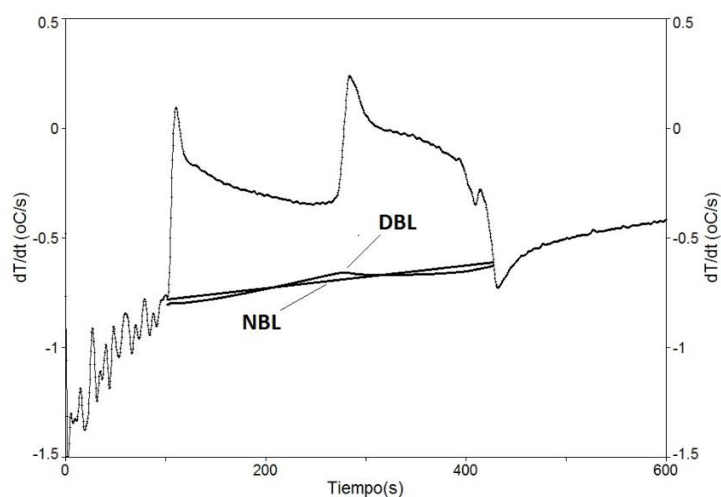


Figura 5. Primera derivada de la temperatura respecto al tiempo y curvas cero de referencia para los métodos NBL y DBL aplicados al procesamiento de la curva de enfriamiento de la muestra M1

Para estos métodos, como se describe en detalle en las referencias [7] y [8] respectivamente, se integra, desde el tiempo de inicio hasta el tiempo de fin de solidificación, el área existente entre la primera derivada y la curva cero. El calor latente se calcula multiplicando esta área por la capacidad calorífica promedio de la aleación durante la solidificación. En todos los cálculos, el valor de capacidad calorífica utilizado para la aleación bajo estudio fue el valor promedio de las capacidades caloríficas de la aleación líquida y sólida mostradas en la Tabla 2. La fracción sólida instantánea a un tiempo t durante la solidificación se calcula integrando el área entre la primera derivada y la curva cero desde t_{is} y hasta el tiempo t y dividiendo esa área parcial entre el área total entre curvas, previamente determinada durante el cálculo del calor latente de fusión.

La Tabla 5 resume los resultados de entalpía de fusión promedio obtenidos de las curvas experimentales incluyendo el intervalo de confianza al 95%, al aplicar los tres métodos considerados en este trabajo, así como los errores

correspondientes calculados para cada método, tomando como referencia el valor del calor latente de fusión reportado en la Tabla 1. Los resultados que se muestran en la Tabla 5 para NBL y DBL sugieren que estos métodos solo pueden usarse para obtener un valor muy burdo del calor latente, incluyendo un error muy significativo en sus predicciones con respecto al valor de referencia de este parámetro. Errores similares han sido reportados por Erbas [13] para métodos newtonianos convencionales.

Tabla 5. Valores calculados de calor latente de fusión mediante los tres métodos considerados en este trabajo y error porcentual implícito en comparación con el valor de referencia

Método	NBL	DBL	MEM	Valor de Referencia [11]
H_f (J/Kg)	226494 +/- 18011	195895 +/- 3254	405405 +/- 63200	434400
% ERROR	47.9	54.9	6.7	-

Los resultados que se muestran en estas tablas también sugieren el método MEM es capaz de predecir entalpías de fusión relativamente más cercanas a los valores de referencia que los otros métodos, aunque con dispersiones mayores que las presentes con los métodos NBL y DBL. Cabe señalar que en un trabajo previo que realizamos con aleación Al-14%Cu [10] también encontramos porcentajes de error similares, asociados a los métodos convencionales y mayores a 40% mientras que el método MEM tuvo un error menor al 6%.

De manera conjunta todo lo anterior sugiere que el empleo del método MEM puede ser útil para reducir los errores comúnmente presentes en la determinación de calor latente de fusión, bajo condiciones experimentales similares cuando se usan los métodos convencionales. La Figura 6 muestra la evolución de la fracción sólida de la muestra M1 en función del tiempo obtenidas aplicando el procesamiento numérico de las curvas de enfriamiento experimentales, utilizando todos los métodos considerados en este trabajo. Aquí se puede ver que la evolución de la fracción sólida predicha por todos los métodos es relativamente similar, aunque existen diferencias observables claramente entre los resultados predichos por el método MEM, que discrepan en cierta medida de las evoluciones de fracción sólida predichas por los métodos NBL y DBL que son muy cercanas una con la otra y prácticamente indistinguibles a la escala en que se grafica la Figura 6.

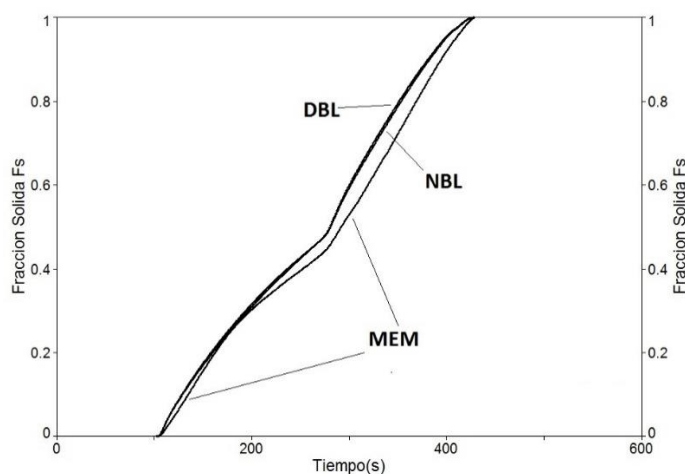


Figura 6. Comparación gráfica de las evoluciones calculadas de la fracción sólida, F_s en función del tiempo usando los tres métodos considerados en este trabajo

Observando la Figura 6 se puede constatar que existe una mayor concordancia entre las evoluciones de la fracción sólida predicha por los métodos NBL y DBL y que el método MEM presenta evoluciones de fracción sólida diferentes durante la mayor parte de la solidificación. En la Figura 6 puede verse también que la evolución de la fracción sólida predicha por el método MEM se ubica por debajo de las evoluciones predichas por los otros dos métodos lo cual sugeriría una solidificación inicialmente más lenta pero que ajusta su velocidad de formación de sólido de modo que finalmente se alcance el fin de la solidificación de la muestra al mismo tiempo que para los otros dos métodos.

La Figura 7 muestra la velocidad de formación de sólido, obtenida derivando con respecto al tiempo las evoluciones de F_s mostradas previamente en la Figura 6. En la Figura 7 se puede constatar, al analizar las evoluciones de la velocidad de formación de sólido predichas por todos los métodos, que estas son muy similares para los métodos NBL y DBL pero que para el método MEM existe una evolución de formación de sólido ligeramente diferente. Se puede ver en la Figura 7 que al inicio de la solidificación los métodos NBL y DBL predicen velocidades de formación de sólido claramente mayor a las predichas por MEM, llegando a alcanzar un máximo inicial que se ubica entre 0.005 y 0.006 s^{-1} en ambos casos, comparado con un máximo de aproximadamente 0.004 s^{-1} en el caso de MEM. En este último caso se observa que la velocidad de formación de sólido se incrementa por momentos, e inclusive es mayor a la predicha por los otros métodos en ciertos intervalos de tiempo durante la solidificación. Lo anterior se asocia con lo observado en la Figura 6 con relación a las evoluciones de la fracción sólida en función del tiempo predichas por NBL y DBL que

se ubican por encima de la evolución propuesta por el método MEM, cuya línea se encuentra por debajo de las otras, sobre todo al inicio de la solidificación primaria y de la solidificación eutéctica.

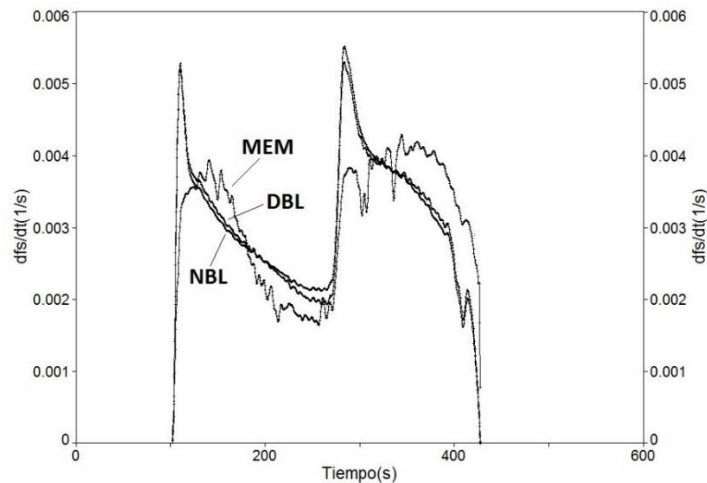


Figura 7. Comparación gráfica de las evoluciones calculadas de la velocidad de formación de sólido dFs/dt

En la Figura 8 se muestra la evolución de la fracción sólida en función de la temperatura que resulta de aplicar todos los métodos de interés al procesamiento numérico de las curvas de enfriamiento de la muestra uno. En esta Figura se puede observar que la solidificación de la aleación bajo estudio se da en dos etapas principales, una primera etapa que corresponde a la formación de la fase primaria, desde una fracción sólida de 0 hasta aproximadamente 0.45 realizada en un amplio intervalo de temperaturas, de 610 °C a 565°C aproximadamente, seguida de un incremento en fracción sólida de 0.45 a 1 en un intervalo de temperatura más estrecho de 570 °C a 555 °C aproximadamente el cual corresponde a la formación del microconstituyente eutéctico Al-Si.

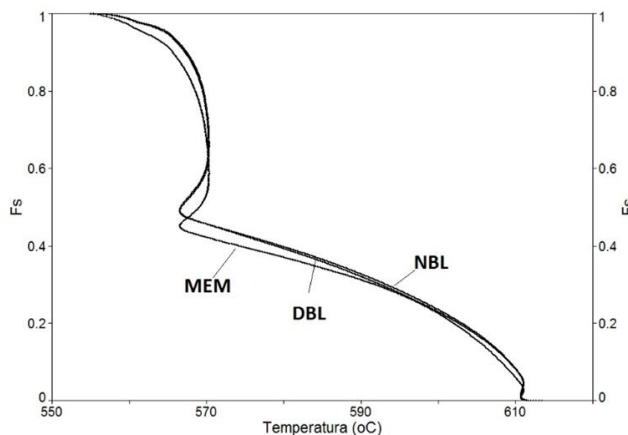


Figura 8.- Evolución de la fracción sólida en función de la temperatura

También se puede observar que existe una clara discrepancia en las evoluciones de la fracción sólida en función de la temperatura predichas por los métodos NBL y DBL que predicen prácticamente la misma evolución, con respecto a la trayectoria predicha por el método MEM y también esta discrepancia se observa en las cantidades de fase primaria presentes en el producto solidificado predichas por una parte por los métodos DBL y NBL que predicen aproximadamente una fracción sólida de fase primaria de 0.49 en comparación con el método MEM que predice una fracción sólida de fase primaria de 0.44, aproximadamente.

Para establecer cuál de las predicciones corresponde más con la realidad experimental se requeriría realizar de manera sistemática determinaciones metalográficas del porcentaje de microconstituyentes para aleaciones hipoeutécticas con diferentes composiciones, que produzcan muestras que presenten diferentes porcentajes de microconstituyentes, seleccionadas para establecer que métodos son los más acertados en cuanto a la predicción de la fracción de microconstituyentes. Sin embargo y dada la naturaleza arbitraria del cálculo de las líneas cero de los métodos NBL y DBL y tomando en cuenta que el método MEM proporciona un tratamiento que se acerca más a la realidad experimental, como lo sugiere la mayor capacidad de predecir valores acertados de calor latente de fusión, se esperaría que las rutas de solidificación predichas por el método MEM fueran más precisas y cercanas a las determinaciones metalográficas. Este aspecto es objeto de otra investigación en curso.

Los resultados mostrados en la Tabla 5 y en las Figuras 6 y 8 sugieren que el método MEM presenta un mejor desempeño para la determinación de valores acertados de calor latente de fusión para la aleación Al-7.5%Si que los

métodos NBL y DBL. Por otra parte, todos los métodos analizados en este trabajo predicen evoluciones de fracción sólida similares, aunque el MEM presenta ligeras discrepancias. Finalmente, los resultados de este trabajo sugieren que el método MEM puede ser empleado para analizar la solidificación de aleaciones con mejores resultados de determinación de calor latente de fusión y resultados similares de predicción de rutas de solidificación que los métodos newtonianos convencionales.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que para la aleación Al-7.5%Si objeto de este estudio el método MEM presenta el mejor desempeño en la determinación del calor latente de fusión y predice evoluciones de fracción sólida similares a las de los métodos DBL y NBL, por lo cual se puede afirmar que el método MEM muestra un muy buen potencial para ser empleado en el estudio de la solidificación de aleaciones.

Los errores, con respecto al valor de referencia, encontrados para las predicciones de calores latentes de fusión asociados a los métodos NBL y DBL aplicados a las curvas experimentales de enfriamiento, van del 48% al 55%, mientras que el método MEM muestra un error del 6% lo que muestra que el uso de este método alternativo podría ser muy útil para reducir los errores comúnmente presentes en la determinación del calor latente de fusión cuando se usan los métodos newtonianos convencionales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los proyectos PAPIIT IN117019 de la UNAM y 225156 de CONACYT México por el apoyo financiero y de infraestructura y también agradecen a los Maestros Anthony Harrup Gutiérrez, Carla Aguilar Muñoz, Agustín Ruiz Tamayo y Cándido Atlatenco Tlapanco por su valioso apoyo durante la experimentación y procesamiento de curvas de enfriamiento.

REFERENCIAS

- [1] D. Stefanescu, Thermal Analysis Theory and Applications in Metalcasting. *International Journal of Metalcasting* 9(1), 7-22. 2015.
- [2] I. Riposan et al. Thermal Analysis to Optimize and Control the Cast Iron Solidification Process. *Solid State Phenomena* 254, 14-19. 2016.
- [3] S. Davenport et al. The usage of computer-aided cooling curve thermal analysis to optimize eutectic refiner and modifier in Al-Si alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 109, 105-111. 2012.
- [4] M. Górnny, G. Sikora, M. Kawalec, Effect of Titanium and Boron on the Stability of Grain Refinement of Al-Cu Alloy. *Archives of Foundry Engineering* 16(3), 35-38. 2016.
- [5] J. Hassan, K. Maryam, F. Saeed, Computer-aided cooling curve thermal analysis and microstructural evolution of Mg-5Zn-xY cast alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 130(3), 1429-1437. 2017.
- [6] F. Yavari, S. Shabestari, Effect of cooling rate and Al content on solidification characteristics of AZ magnesium alloys using cooling curve thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 129(2), 655-662. 2017.
- [7] K. Upadhyaya, D. Stefanescu, K. Lieu, D. Yeager, Computer-aided cooling curve analysis: principles and applications in metal casting. *Transactions of the American Foundrymen's Society* 97, 61-66. 1989.
- [8] P. Marchwica, J. Sokolowski, W. Kierkus, Fraction solid evolution characteristics of AlSiCu alloys-dynamic baseline approach. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 47, 115-36. 2011.
- [9] E. Frás, W. Kapturkiewicz, A. Burbielko, H. Lopez, A new concept in thermal analysis of castings. *Transactions of the American Foundrymen's Society* 101: 505-11. 1993.
- [10] R. González, M. Aguilar, G. Harrup, Determinación del calor latente de solidificación y la evolución de fracción sólida de la aleación Al-14% Cu mediante un método alternativo de análisis térmico asistido por computador. *Desarrollo e innovación en ingeniería*, 438-446. 2018.
- [11] D. Emadi, I. Whiting, M. Djurdjevic, W. Kierkus, J. Sokolowski, Comparison of newtonian and fourier thermal analysis techniques for calculation of latent heat and solid fraction of aluminum alloys. *Metallurgija*, 91- 106. 2004.
- [12] R. Redmond, J. Lones, Enthalpies and heat capacities of stainless steel (316), zirconium, and lithium at elevated temperatures (No. ORNL-1342), Oak Ridge National Lab. 1952.
- [13] K. Erbaş, Analytically Solved Solid Fraction Model for the Newtonian Thermal Analysis of Casting. *Metallurgical and Materials Transactions A* 47(6), 3026-30. 2016.

La importancia de los catalizadores en la gasificación de biomasa: Una revisión de la literatura

Juan C. Acevedo P.¹

Erika Arenas C.²

Zulamita Zapata B.³

Fausto R. Posso R.⁴

^{1, 2, 3} Universidad Pontificia Bolivariana

^{1, 4} Universidad de Santander
Colombia

Este capítulo, tiene como objetivo identificar y analizar el efecto de los catalizadores y algunas variables operativas en la gasificación de biomasa. Con este propósito, se realizó una revisión sistemática de literatura y un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas en la base de datos Scopus®. Los resultados obtenidos evidencian que la temperatura es la variable más importante, ya que afecta el rendimiento de la producción de hidrógeno y por ende la eficiencia del proceso, se recomienda un rango de operación entre 900 y 950 °C. El uso del aire es más económico a escala industrial y permite un proceso auto térmico, pero produce un gas de síntesis o *syngas* con menor poder calorífico comparado con el uso del vapor como agente gasificante. Adicionalmente, este último es más difícil de escalar por el suministro de calor que requiere, lo cual incrementa los costos de operación. Los catalizadores de metales alcalinos son más activos en la gasificación que los alcalino-térreos y de transición, en virtud de su alta difusividad y mayor temperatura de descomposición. Los más representativos son el potasio (K) y el sodio (Na), utilizados ampliamente para la eliminación del alquitrán y mejorar la calidad del gas producido. Respecto a los catalizadores de metales alcalino-térreos los más importantes son el calcio (Ca) y el magnesio (Mg), el Ca es muy utilizado para la captura de dióxido de carbono (CO₂) lo cual aumenta la concentración de hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) en el *syngas*. Las propiedades del catalizador son esenciales en su selección, se sugiere con el fin de mejorar la calidad del *syngas* y una mayor vida útil del mismo seguir el siguiente orden: selectividad, estabilidad, actividad. Las causas más comunes para que un catalizador se desactive durante la gasificación son la sinterización y el envenenamiento debido a las altas temperaturas del proceso y las impurezas de la biomasa, respectivamente. Finalmente, China y Estados Unidos se consolidan como los pioneros a nivel mundial en la producción científica en gasificación de biomasa, Colombia se ubica en el segundo lugar a nivel regional después de Brasil, ocupando el puesto 28 en el ranking mundial con una producción científica que equivale al 0,8% de la producción total.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de los combustibles fósiles ha conllevado a un deterioro significativo en la capa de ozono debido a la gran cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) que son expulsados a la atmósfera sin ningún tratamiento previo. Las emisiones de CO₂ han tenido un incremento a nivel mundial del 2,8% en los últimos cinco años [1]. Se proyecta que para 2030 dichas emisiones en Colombia alcancen los 332,7 millones de toneladas de CO₂ equivalentes si no se llevan a cabo acciones remediales sistemáticas y efectivas [2]. Así mismo, el incremento de la población y la modernización hacen que el consumo energético aumente, trayendo consigo un mayor volumen de emisiones de GEI, agotamiento de las reservas de estos combustibles y más problemas medioambientales [3]. Por tanto, es fundamental la búsqueda de estrategias para superar los impactos económicos y ambientales del uso de combustibles fósiles como principal fuente de energía. Así, el desarrollo de las fuentes primarias renovables de energía y los vectores que de ellas se derivan son una alternativa idónea para diversificar la canasta energética y mitigar la contaminación ambiental.

En este sentido, las energías renovables se proyectan según la International Energy Agency [IEA] como una de las principales fuentes de energía eléctrica en el año 2050 con un 31% de participación sobre la generación eléctrica total, después del gas natural con un 39%. Caso contrario para el carbón y la energía nuclear que evidencian una reducción del 11 y 7%, respectivamente, con relación a su participación en la oferta energética actual [4]. Esto ratifica la importancia de promover proyectos o tecnologías que masifiquen la utilización de la biomasa como fuente de energía limpia y renovable. La biomasa se obtiene a partir de diferentes recursos agrícolas, forestales, industriales, pecuarios, acuáticos y urbanos [5]; y presenta algunas ventajas como su capacidad de transformación en combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, bajas emisiones tóxicas durante su utilización, otorga valor agregado a residuos considerados desechos y comparada con otros tipos de energía renovable su disponibilidad es continua y no está condicionada a la variación de condiciones climáticas como la energía solar o eólica [6].

Existen diferentes procesos aplicados en la industria para el aprovechamiento de la biomasa, tales como: combustión directa, agroquímicos, bioquímicos y termoquímicos [7]. Dentro de este último, se encuentra la gasificación, el cual es un proceso que ocurre en presencia limitada de oxígeno combinado con un material carbonoso para producir un gas combustible compuesto principalmente por H₂ y CO [8]. El proceso es desarrollado en presencia de un agente gasificante (por ejemplo, aire, vapor de agua, oxígeno), el cual depende del tipo de gas que se desee obtener, se realiza a diferentes temperaturas que oscilan entre 400 a 1500 °C y a presiones atmosféricas o elevadas (alrededor de los 33 bar) [9], en muchos casos se utilizan materiales fluidizables e inertes como arena, para aquella biomasa que tenga

¹ jua.acevedo@mail.udes.edu.co; juan.acevedop@upb.edu.co

² erika.arenas@upb.edu.co

³ zulamita.zapata@upb.edu.co

⁴ directormgcti@udes.edu.co

dificultades en la fluidización. La gasificación es aplicable a la biomasa que presente un contenido de humedad por debajo del 35% [10], cuando supera este valor se recomienda precalentarla y secarla hasta alcanzar entre el 10% y 20% del contenido de humedad, antes de ser introducida al gasificador, para no afectar la eficiencia del proceso [11].

De otra parte, el uso de catalizadores en la gasificación ha tomado gran importancia, puesto que, no solo mejora el rendimiento del producto deseado, sino que también hace que el proceso sea económico mediante la reducción de alquitranes y productos no deseados [12]. La dolomita (CaCO_3 ; MgCO_3) y el olivino (Mg_2SiO_4 ; Fe_2SiO_4) son dos de los catalizadores minerales naturales más utilizados en la gasificación de biomasa. Aunque el rendimiento del producto gaseoso se puede mejorar sustancialmente con estos catalizadores, se requiere una etapa adicional de limpieza del gas ya que la calidad del producto final es inadecuada para el uso directo en diferentes aplicaciones, como las celdas de combustible [13]. Los metales alcalinos, como potasio, sodio, litio y rubidio, se han utilizado también como catalizadores en el procesamiento termoquímico de la biomasa, mejorando la velocidad de reacción de la gasificación, sin embargo, son susceptibles a la pérdida de actividad a altas temperaturas debido a la aglomeración de partículas [14]. Alternativamente, los catalizadores basados en metales de transición, particularmente el níquel, son excelentes para la gasificación de la biomasa, debido a su eficacia en la eliminación de alquitranes y la capacidad de mejorar la calidad del gas producido [15].

En este contexto, el documento tiene como objetivo presentar revisión de literatura, para identificar la importancia del uso de catalizadores en el aprovechamiento de la biomasa mediante gasificación, evaluando su efecto en el rendimiento del proceso, calidad de los productos generados y reducción de gases tóxicos al ambiente, información que puede ser útil para el desarrollo de nuevos estudios en el área de catálisis y procesos termoquímicos. Adicionalmente se presenta un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas en la base de datos Scopus®, que permite inferir las tendencias en la temática durante los años recientes dentro de la comunidad científica.

2. GASIFICACIÓN DE BIOMASA

El proceso de gasificación fue descubierto en Francia e Inglaterra en 1798, pero su desarrollo tecnológico se dio 60 años después, cuando fue posible iluminar gran parte de Londres utilizando el gas producido a partir del carbón. El primer proceso de gasificación se realizó en Francia hace más de 180 años para producir combustibles a partir de alimentos orgánicos, dicho combustible fue utilizado para conducir el primer vehículo diseñado por J. W. Parker en Escocia en 1901 [16]. Posteriormente, durante la segunda guerra mundial se construyeron más de un millón de gasificadores a pequeña escala para el procesamiento de biomasa y sus derivados, para producción de vapor, energía eléctrica y combustible para automotores [17].

La gasificación consiste en la transformación parcial o total de los componentes de un combustible sólido en gas, lo cual es realizado bajo tratamientos térmicos o reacciones químicas, o una combinación de las dos [18]. Es un método prometedor para producir *syngas* o gas de síntesis, dicho gas contiene CO , H_2 , CH_4 , hidrocarburos alifáticos, benceno, tolueno y alquitranes (además de CO_2 y H_2O) y se forma a temperaturas por debajo de $1000\text{ }^\circ\text{C}$ [19]. El H_2 y el CO representan el 50% de la energía en el *syngas*, mientras que la energía restante está contenida en el CH_4 e hidrocarburos [20]. El gas de síntesis se puede utilizar como materia prima eficiente para producir biodiesel, convertir en gas metano a través del método Sabatier, síntesis de combustible vía Fischer-Tropsch [21], o alimentar las celdas de combustible de membranas de intercambio de protones (PEM) para producir energía eléctrica [22].

2.1 Estructura y composición de la biomasa

Se considera biomasa a cualquier material orgánico, no fosilizado, proveniente de residuos vegetales y animales, desechos industriales o residuos de plantas de tratamientos de aguas. Se caracteriza por tener relaciones O/C, H/C altas, en comparación con el carbón, lo cual se relaciona con un residuo de menor poder calorífico y mayor contenido de material volátil [23]. Un tipo importante de biomasa son las derivadas de residuos vegetales, comúnmente denominadas biomasa lignocelulósicas, donde se incluyen los residuos agroindustriales. La biomasa se compone principalmente de tres macromoléculas: celulosa, hemicelulosa y lignina, además de extractivos y minerales [24].

La celulosa es, generalmente, un polímero lineal cristalino, cuya unidad estructural es la glucosa que se encuentra ligada por enlaces glucosídicos tipo β -D que forma cadenas de hasta 10000 unidades estructurales (grado de polimerización). La estructura cristalina actúa como un escudo protector para la descomposición térmica de cadenas internas de celulosa, cuando estas son sometidas a calentamiento [25]. Los polímeros de celulosa dentro de la biomasa se reorganizan para formar fibrillas, que dan a la celulosa una estructura cristalina y sus propiedades únicas de resistencia mecánica y estabilidad química, que influyen a su vez en la forma y selección de tecnología de aprovechamiento de las mismas [26].

La hemicelulosa está compuesta por estructuras poliméricas amorfas, más cortas y ramificadas y, en su mayoría, por azúcares de 5 y 6 carbonos (xilosa, glucosa). Usualmente, la hemicelulosa tiene un grado de polimerización entre 100-200 unidades, lo que significa que cada cadena de la hemicelulosa tiene alrededor de 200 monómeros unidos. Además,

las cadenas pueden ser ramificadas en lugar de ser cadenas lineales, esto dificulta que se creen estructuras cristalinas [27], lo cual le confiere mayores posibilidades de ataque enzimático o transformación termoquímica.

La lignina es una macromolécula compleja no cristalina, compuesta por una variedad de constituyentes aromáticos como alcoholes sinapílico, cumarílico y coniferílico, unidos por enlaces tipo β -éter [28]. La lignina y la hemicelulosa actúan como agentes ligantes de la celulosa, haciendo que las fibras de celulosa, permanezcan unidas. La estructura de la lignina no ha podido ser consolidada, debido a la complejidad del proceso de aislamiento de la misma, dicha estructura se puede asociar a la de un carbón de bajo rango (lignitos). La dificultad radica en sus múltiples unidades estructurales, las cuales no suelen repetirse de forma periódica. Además, la composición y estructura de la lignina varían dependiendo de su origen y el método de extracción o aislamiento utilizado [29].

El contenido de material mineral varía según el tipo de biomasa, comúnmente está compuesto de minerales de origen alcalino y alcalinotérreo como Na, K, Ca, Mg, Mn, Co, Zn, Cu, Si, formando óxidos o sales como cloruros, carbonatos, fosfatos y sulfatos [30]. Estos minerales juegan un papel fundamental en los tratamientos térmicos de las biomásas al actuar como catalizadores de algunas reacciones, como la deshidratación de la biomasa para favorecer la producción de *char* y el craqueo catalítico de los volátiles pesados generados durante la etapa de desvolatilización. Además, son importantes en los procesos termoquímicos, por promover fenómenos de ensuciamiento (escoriación o *slagging*) en las cámaras de reacción, tanto en la gasificación como en la combustión de biomásas. De hecho, la composición mineralógica es un factor determinante en la utilización energética de las biomásas, ya que limita la temperatura del proceso según la temperatura de fusibilidad de las cenizas [31].

2.2 Mecanismo de reacción y variables de operación

La química de la gasificación de la biomasa es compleja y, en términos generales, el proceso consta de cuatro etapas: secado, desolación (pirólisis), oxidación y reducción [32]. Las características físicoquímicas de la biomasa y del *char* obtenido en el proceso de pirólisis, el tipo de reactor y sus condiciones de operación, el agente gasificante y su concentración en la atmósfera reactiva influyen en la composición química del gas producido durante la gasificación [33]. El gas obtenido se compone principalmente de H_2 , CO_2 , CO , CH_4 , algunas trazas de hidrocarburos pesados como C_2H_4 y C_2H_6 , agua y pequeñas partículas de contaminantes como carbonizado, cenizas y alquitranes [34].

En el proceso de gasificación intervienen una serie de reacciones químicas, divididas en heterogéneas y homogéneas. Las reacciones heterogéneas (sólido-gas) ocurren entre los productos de la pirólisis (volátiles y carbonizado) y el agente gasificante, y las reacciones homogéneas se llevan a cabo entre los productos de las reacciones primarias con el agente gasificante en fase gaseosa [35]. Dichas reacciones inician a temperaturas mayores a $500\text{ }^\circ\text{C}$, sin embargo, la velocidad de reacción es lenta y el proceso requiere mucho tiempo para desarrollarse a estos niveles de temperatura [6]. Las reacciones heterogéneas son consideradas las más importantes y se conocen como reacciones primarias, se caracterizan por limitar la velocidad del proceso de gasificación al ser más lentas que las reacciones homogéneas [36]. En la Tabla 1 se muestran las principales reacciones del proceso de gasificación.

Tabla 9. Reacciones de gasificación [37], [38]

Tipo	Nombre de reacción	Reacción	Entalpía (kJ/mol)
Heterogénea	Oxidación parcial	$C + 0,5O_2 \rightarrow CO$	-111
	Oxidación	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394
	Hidrogasificación	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74,8
	Carbonizado - vapor de agua	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	131
	Boudouard	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	172
Homogénea	Conversión agua-gas	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41,2
	Reformado de metano	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	206

Cuando se tiene oxígeno o aire como agente gasificante ocurren las reacciones de oxidación, que son de carácter exotérmico y suministran la energía requerida, haciendo el proceso autotérmico. Las reacciones de gasificación del C con CO_2 e H_2 son lentas y requieren condiciones especiales de temperatura y presión. Las reacciones carbonizado-vapor de agua y conversión agua-gas son las principales reacciones heterogéneas y homogéneas de gasificación, respectivamente, cuando el agente gasificante es vapor de agua [39]. Lo cual cambia si el oxígeno es el medio gasificante, la reacción dominante es la reacción Boudouard [36].

De otra parte, la velocidad de gasificación del carbonizado depende de la reactividad "R" tanto del carbonizado como del agente de reacción; usualmente: $R_{C+O_2} \gg R_{C+H_2O} > R_{C+CO_2} \gg R_{C+H_2}$ [40]. Algunos gases como el H_2 y CO tienen efectos inhibitorios en la velocidad de gasificación de las reacciones carbonizado-vapor de agua y Boudouard, respectivamente, por lo tanto, es necesario extraerlos del lugar de reacción [41]. Por ejemplo, Barrio et al. [41] encontraron que la velocidad de reacción carbonizado-vapor de agua se puede reducir 15 veces por la presencia de un 30% de H_2 en la atmósfera reactiva. Existen diversas características en el carbonizado que influyen en la reacción, tales como: condiciones de pirólisis, pretratamiento y conversión previa, estructura superficial, centros activos disponibles para la reacción, tamaño de partícula, contenido de minerales y su efecto catalítico [33].

Existen diferentes variables de operación que afectan el proceso de gasificación y por ende la composición final del gas de síntesis. Dentro de los parámetros de funcionamiento más relevantes se encuentran la temperatura, la presión y el agente gasificante [23]. Respecto a la temperatura, afecta los rendimientos de los productos y por ende la eficiencia del proceso, así como la calidad del gas, todo debido al comportamiento termodinámico de las reacciones y al equilibrio entre las reacciones endotérmicas y exotérmicas [42]. La lignina es un componente refractario de la biomasa, no se gasifica bien a temperaturas bajas, la gasificación térmica de la biomasa lignocelulósica prefiere una temperatura en un rango de 800 a 900 °C, puesto que, las altas temperaturas favorecen el craqueo de alquitranes generados, produciendo más gas y menos *char* y alquitranes [38]. Se ha encontrado que la concentración de H₂ aumenta con la temperatura y el contenido de CH₄ y CO₂ tienen tendencia opuesta [43]. En cuanto al CO, este también aumenta con la temperatura cuando se utiliza vapor de agua, ya que a temperaturas más altas el carbono tiende a reaccionar con vapor y CO₂ para producir mayores cantidades de CO [44].

En la actualidad los procesos de gasificación se operan a presiones que van desde la atmosférica hasta alrededor de los 180 bar, la presión se selecciona generalmente de acuerdo con los requisitos del proceso o equipo aguas arriba o aguas abajo del gasificador; con el aumento de la presión la reacción de metanación se favorece, haciendo que la cantidad de alquitrán disminuya y la fracción de hidrocarburo aromático aumente [45]. De igual forma, la presión tiene un efecto en los rendimientos gaseosos del proceso de gasificación, lo cual puede explicarse por su influencia en reacciones en fase gaseosa, como aceleración de la cinética de desplazamiento agua-gas y cambio en las reacciones de los hidrocarburos pesados que se desprenden de la estructura carbonosa y el contenido volátil [46]. Un aumento de la presión da mayor tiempo de residencia a los gases dentro de las partículas, lo que hace que los alquitranes se craqueen y favorece, por lo tanto, las reacciones sólido-gas [31]. La producción de H₂ disminuye con la alta presión, ya que el equilibrio químico de las reacciones de producción de hidrógeno (reacción heterogénea agua-gas, la reacción de reformado de vapor y la reacción de metano) se desplazan hacia el lado de los reactivos, lo mismo sucede con el CO que prefiere altas temperaturas y bajas presiones [47].

Otro parámetro importante, es el agente gasificante, el cual es un gas que reacciona con el carbono sólido y los hidrocarburos más pesados para convertirlos en gases de bajo peso molecular como el CO y el H₂ [48]. Los agentes gasificantes típicos incluyen aire, vapor de agua, CO₂, O₂ y mezclas de estos, la selección depende de la economía del mismo [43]. El uso de aire es bastante común en escalas demostrativas e industriales en virtud de su bajo costo. Además, permite un proceso exotérmico y por tanto la posibilidad de ser autotérmico, pero diluye el gas de síntesis en N₂ cuya fracción en este es alrededor del 50% y con esto se disminuye el poder calorífico [49], lo que genera un *syngas* con un poder calorífico bajo (4–6 MJ/Nm³) [50].

De otra parte, el uso del O₂ permite obtener un gas con un mayor poder calorífico (10 a 15 MJ/Nm³) y se alcanzan temperaturas en el proceso entre 1000 y 1400 °C. Sin embargo, el suministro de oxígeno puede traer un problema simultáneo de costo y seguridad [51]. Cuando se emplea vapor de agua también se obtiene un gas de síntesis con menos contenido de N₂, con aumento de H₂ y un gas con poder calorífico aceptable (entre 9 y 13 MJ/Nm³), en comparación con los gases combustibles tradicionales. No obstante, la gasificación con vapor es un proceso considerablemente más difícil de escalar, por el suministro de calor en los reactores a gran escala [52]. Finalmente, el uso de CO₂ en la gasificación es prometedor por ser uno de los productos del proceso y porque disminuye la formación de alquitrán en presencia de catalizadores, así como aumenta el contenido de H₂ y CO en el *syngas* comparado con la gasificación con aire. Se recomienda que su uso, se haga de forma integrada, es decir, que provenga de un proceso previo como la combustión [53].

2.3 Tecnologías de gasificación

Los gasificadores se clasifican principalmente de acuerdo con el tipo de contacto gas-sólido y agente gasificante. Se clasifican en tres tipos principales: lecho fijo o móvil, lecho fluidizado y flujo arrastrado [23].

- *Gasificación en lecho fijo o móvil.* En estos gasificadores el agente gasificante fluye de forma que entra en contacto con el material combustible a gasificar en un lecho de partículas sólidas. Dependiendo de la dirección del flujo a través del lecho, estos reactores se pueden clasificar en *Updraft* y *Downdraft*. En los gasificadores tipo *Updraft*, el agente gasificante fluye hacia arriba desde la parte baja y circula en contracorriente, el gas combustible sale por la parte superior a temperaturas relativamente bajas, debido a que el calor sensible es utilizado para precalentar y secar el combustible, genera un alto contenido de alquitranes, lo que dificulta la utilización del gas producido en motores de combustión interna [23]. De otra parte, en los gasificadores *Downdraft*, el agente gasificante ingresa por la parte media y el gas producido se receptiona por la parte baja, lo cual aumenta el contenido de cenizas y humedad en el producto final [54].
- *Gasificación en lecho fluidizado.* En este tipo de reactores el material combustible es gasificado en un lecho que permite la suspensión de las partículas debido al flujo del agente gasificante (como vapor, aire, oxígeno); este sistema promueve una buena mezcla entre el material carbonizado y el agente de reacción, logrando el desarrollo de elevadas velocidades de reacción que incentivan la formación de la fase volátil; además, se logra uniformidad en los perfiles de temperatura y concentración a lo largo del cuerpo del reactor [23]. Una de las principales ventajas

de este tipo de reactores es el buen contacto sólido-gas, la alta capacidad de procesamiento y el buen control de las condiciones de operación, reflejadas en el bajo contenido de alquitranes en el gas de síntesis producido. Como desventaja se presenta un escape de material sólido en la corriente gaseosa que debe ser separado en un ciclón y recirculado al lecho [55].

Estos equipos se clasifican en dos tipos: burbujeante y circulante. Los gasificadores de lecho fluidizado burbujeante fueron desarrollados por Fritz Winkler en 1921 y son los más utilizados para la gasificación de biomasa. El tamaño de la partícula alimentada debe ser menor a 10 mm, el material de lecho es fluidizado con vapor, aire, oxígeno, o la mezcla de ellos. La ceniza generada por el combustible o los materiales inorgánicos asociados con ella se drena fácilmente desde el fondo del reactor. La temperatura del lecho se mantiene normalmente por debajo de 980 °C para el carbón y por debajo de 900 °C para la biomasa, para evitar la fusión de cenizas y la consiguiente aglomeración [56]. Respecto a los gasificadores de lecho fluidizado circulante tienen un atractivo especial para la gasificación de biomasa debido al largo tiempo de residencia del gas en el reactor, adecuado especialmente para combustibles con alto contenido de materiales volátiles. Los lechos fluidizados circulantes y burbujeantes son significativamente diferentes en su forma hidrodinámica, es decir, la velocidad de fluidización en un lecho circulante es mucho más alta (3,5-5,5 m/s) que en un lecho burbujeante (0,5-1,0 m/s). Además, hay una alta migración de sólidos desde la tubería ascendente del lecho circulante, que se capturan y devuelven a la base del reactor. Dependiendo del combustible y la aplicación, el reactor funciona a temperaturas entre 800 y 1000 °C [23].

- *Gasificación en lecho arrastrado.* Los gasificadores de flujo de arrastre son ampliamente utilizados en la gasificación a gran escala de carbón, coque de petróleo y residuos de refinería. Es ideal para la mayoría de los tipos de carbón, excepto el carbón de bajo rango, que, como el lignito y la biomasa, no es atractivo debido a su gran contenido de humedad. El carbón con alto contenido de cenizas también es menos adecuado porque la eficiencia de producción de gas disminuye al aumentar el contenido de cenizas [38]. Esta gasificación no es común para la biomasa por el corto tiempo de residencia del material en el reactor, el tamaño de partícula debe ser muy fino (80-100 μm) y el contenido de cenizas afecta la eficiencia del proceso. La temperatura de gasificación generalmente supera los 1000 °C, lo cual permite la producción de un gas casi libre de alquitrán y con un contenido de metano muy bajo [57].

3. CATÁLISIS Y CATALIZADORES EN GASIFICACIÓN

La catálisis es la clave de las transformaciones químicas, la mayoría de las síntesis industriales y casi todas las reacciones biológicas requieren catalizadores. Además, la catálisis es una tecnología importante en la protección del medio ambiente, para la prevención de emisiones, por ejemplo, el convertidor catalítico para automóviles. Las reacciones catalíticas se han utilizado desde la antigüedad, aunque en ese momento no se reconoce el principio de la catálisis. Por ejemplo, la fermentación del azúcar en etanol y la conversión de etanol en ácido acético son catalizadas por enzimas (biocatalizadores). Sin embargo, el desarrollo científico sistemático de la catálisis comenzó hace aproximadamente 200 años, y su importancia ha crecido continuamente [58]. El término "catálisis" fue introducido en 1836 por Berzelius para explicar varias reacciones de descomposición y transformación, supuso que los catalizadores poseen poderes especiales que pueden influir en la afinidad de las sustancias químicas. Una definición que sigue siendo válida en la actualidad se debe a Ostwald en 1895: *un catalizador acelera una reacción química sin afectar la posición del equilibrio*. Ostwald reconoció la catálisis como un fenómeno omnipresente que debía explicarse en términos de las leyes de la física química.

Aunque anteriormente se suponía que el catalizador permanecía inalterado en el curso de la reacción, ahora se sabe que el catalizador está implicado en la unión química con los reactivos durante el proceso catalítico. Por lo tanto, la catálisis es un proceso cíclico: los reactivos están ligados a una forma del catalizador, y los productos se liberan de otro, regenerando el estado inicial. Los complejos catalíticos intermedios son en la mayoría de los casos altamente reactivos y difíciles de detectar. En teoría, no se consumiría un catalizador ideal, pero este no es el caso en la práctica. Debido a reacciones competitivas, el catalizador sufre cambios químicos y su actividad se vuelve más baja (desactivación del catalizador). Además de acelerar las reacciones, los catalizadores influyen en la selectividad de las reacciones químicas. Esto significa que se pueden obtener productos completamente diferentes a partir de un material inicial dado, mediante el uso de diferentes catalizadores [59]. Los catalizadores pueden ser gases, líquidos o sólidos. La mayoría de los catalizadores industriales son líquidos o sólidos, por lo que estos últimos reaccionan solo a través de su superficie. La importancia de la catálisis en la industria se demuestra por el hecho de que el 75% de todos los productos químicos se producen con la ayuda de catalizadores; en los procesos recientemente desarrollados, la cifra es superior al 90% [59]. Numerosos productos intermedios orgánicos, necesarios para la producción de plásticos, fibras sintéticas, productos farmacéuticos, colorantes, resinas y pigmentos, solo pueden producirse por procesos catalíticos [60].

3.1 Tipos de catalizadores

Los numerosos catalizadores conocidos en la actualidad se pueden clasificar según diversos criterios: estructura, composición, área de aplicación o estado de agregación. A continuación, se clasifican los catalizadores de acuerdo con

el estado de agregación en el que actúan. Hay dos grandes grupos: catalizadores heterogéneos y catalizadores homogéneos. También existen formas intermedias, como catalizadores homogéneos unidos a sólidos (catalizadores soportados), también conocidos como catalizadores inmovilizados [61]. En los catalizadores soportados, la sustancia catalíticamente activa se aplica a un material de soporte que tiene una gran área superficial y generalmente es poroso. Los catalizadores más importantes son los catalizadores heterogéneos, se estima que la participación en el mercado de los catalizadores homogéneos es solo de aproximadamente 10-15% [59].

- *Catalizadores homogéneos.* Son generalmente compuestos químicos bien definidos o complejos coordinados, que, junto con los reactivos, se dispersan molecularmente en el medio de reacción. La catálisis homogénea se da cuando los procesos catalíticos tienen lugar en una fase gaseosa o líquida uniforme. Algunos catalizadores incluyen ácidos minerales y compuestos de metales de transición (e. g. complejos de rodicarbonilo en la oxo síntesis) [59].
- *Catalizadores heterogéneos.* Se refiere a los catalizadores que actúan en una fase diferente que los reactivos. La mayoría de estos catalizadores son sólidos que actúan sobre sustratos en una mezcla de reacción líquida o gaseosa. De acuerdo con el proceso de adsorción existen diversos mecanismos para describir las reacciones en la superficie del catalizador. El área superficial total del sólido tiene un efecto importante en la velocidad de reacción. Algunos ejemplos de catalizadores heterogéneos son redes de Pt/Rh para la oxidación de amoníaco a gases nitrosos, catalizadores soportados como Ni en diatomita para el endurecimiento de grasa y aluminosilicatos amorfos o cristalinos para craquear fracciones de petróleo [62].
- *Biocatalizadores (enzimas).* Las enzimas son moléculas de proteínas de tamaño coloidal (e. g. aminoácidos). Algunos de ellos actúan en forma disuelta en las células, mientras que otros están químicamente unidos a las membranas celulares o en las superficies. Las enzimas se pueden clasificar en algún lugar entre catalizadores homogéneos moleculares y catalizadores heterogéneos macroscópicos. Las enzimas son la fuerza impulsora de las reacciones biológicas, exhiben actividades y selectividades notables. Por ejemplo, la enzima catalasa descompone el peróxido de hidrógeno 109 veces más rápido que los catalizadores inorgánicos [61]. Las enzimas son moléculas orgánicas que casi siempre tienen un metal como centro activo. A menudo, la única diferencia con los catalizadores homogéneos industriales es que el centro metálico está ligado por una o más proteínas, dando como resultado una masa molecular relativamente alta [59].

3.2 Propiedades del catalizador

La idoneidad de un catalizador para un proceso industrial depende principalmente de las siguientes tres propiedades: actividad, selectividad y estabilidad (comportamiento de desactivación). Es difícil determinar cuál de estas funciones es la más importante, debido a que, las demandas hechas sobre el catalizador son diferentes para cada proceso. Sin embargo, en la actualidad el uso eficiente de materias primas y energía es de gran importancia, y es preferible optimizar los procesos existentes que desarrollar otros nuevos [63].

- *Actividad.* La actividad catalítica se refiere a la velocidad con la cual se induce a la reacción a seguir hacia el equilibrio químico y puede definirse como la propiedad de aumentar la velocidad de la reacción con respecto a la manifestada sin catalizador, en las mismas condiciones de temperatura, presión, concentración, etc. La actividad puede incrementarse usualmente elevando la temperatura, aunque de esta manera se puede acortar la vida del catalizador o incrementar reacciones indeseables [64].
- *Selectividad.* La selectividad de una reacción es la fracción del material de partida que se convierte en el producto deseado. Varía usualmente con la presión, temperatura, composición de los reactantes, extensión de la conversión y naturaleza del catalizador, y por lo cual se debe hablar de la selectividad de una reacción catalizada bajo condiciones específicas. Se expresa por la relación entre la cantidad de producto deseado y la cantidad de materia prima reaccionada de una reacción asociada y, por lo tanto, proporciona información sobre el curso de la reacción. Además de la reacción deseada, también pueden ocurrir reacciones paralelas y secuenciales.
- *Estabilidad.* La estabilidad es la capacidad de un catalizador de mantener sus propiedades, en especial la actividad y la selectividad durante un tiempo de uso suficiente para aplicarlo industrialmente. En general, el catalizador pierde eficacia con el tiempo debido a cambios físicos o químicos ocurridos durante la reacción. La estabilidad puede expresarse también como el tiempo de vida útil del catalizador. Los catalizadores que pierden actividad durante un proceso, a menudo se pueden regenerar antes de que finalmente tengan que ser reemplazados. La duración total del catalizador es de crucial importancia para la economía de un proceso [64].

3.3 Etapas de una reacción catalítica heterogénea

El proceso global de una reacción de catálisis heterogénea procede a través de una serie de etapas representadas en la Figura 1: 1) Transferencia de masa (difusión) del o los reactivos del seno del fluido hacia la superficie externa de la partícula de catalizador, 2) Difusión de los reactivos desde la boca del poro a la vecindad de la superficie catalítica, 3)

Adsorción de los reactivos sobre la superficie del catalizador, 4) Reacción sobre la superficie catalítica, 5) Desorción de los productos de la superficie, 6) Difusión de los productos desde el interior de los poros hacia la superficie externa, y 7) Transferencia de masa de los productos de la superficie externa de la partícula hacia el seno del fluido.

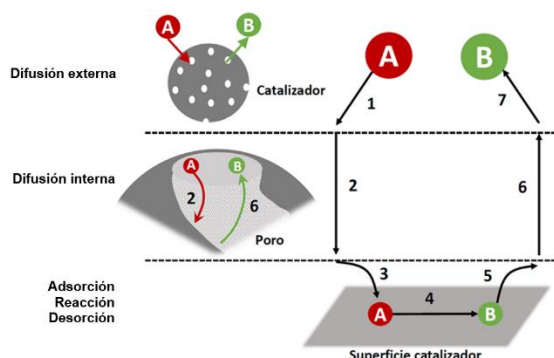


Figura 1. Etapas de una reacción catalítica heterogénea [65]

La velocidad total de reacción es igual a la velocidad del paso más lento en el mecanismo. Cuando los pasos de difusión (1, 2, 6 y 7) son muy rápidos, en comparación con los pasos de reacción (3, 4 y 5), las concentraciones en la vecindad inmediata de los sitios activos no se diferencian de aquellas del seno del fluido. En este caso, los pasos de transporte o difusión no afectan la velocidad total de la reacción, pueden ser despreciados y se suele enfocar solo en las etapas de adsorción, reacción superficial y desorción para determinar la velocidad total de la reacción [65].

El tipo de adsorción que afecta a la velocidad de reacción química es la quimisorción. Los sitios activos son puntos sobre la superficie catalítica que pueden formar enlaces químicos fuertes con un átomo o molécula adsorbida [64]. La adsorción química o quimisorción fue propuesta por Langmuir en 1916, en este caso las moléculas de gas se mantienen unidas a la superficie formando un enlace químico fuerte. Este hecho define las características propias de la quimisorción: (i) Una interacción más fuerte que la fisisorción; (ii) Las entalpías de quimisorción son mucho mayores que las de fisisorción; (iii) La quimisorción es específica, por ejemplo el N_2 es quimisorbido a temperatura ambiente sobre Fe, W, Ca y Ti, pero no sobre Ni, Zn, Ag, Cu o Pb; (iv) Dado que se involucra la formación de un enlace entre adsorbato y el adsorbente, el proceso se detiene tras la formación de una monocapa sobre la superficie; y (v) En general, la quimisorción implica la rotura y formación de enlaces, por lo que la molécula quimisorbida no mantiene la misma estructura electrónica (enlaces) que en fase gaseosa [59]. Después de que un reactivo se adsorbe sobre la superficie, se promueve la reacción sobre la superficie del catalizador. Existen dos mecanismos ampliamente utilizados que describen dicha reacción [59]:

- **Mecanismo de Langmuir – Hinshelwood.** Este mecanismo se basa en el supuesto que ambas moléculas de reacción A y B, se adsorben sin disociación en diferentes sitios libres en la superficie del catalizador. Luego las moléculas quimisorbidas cercanas reaccionan para obtener el producto C, adsorbido en la superficie. Finalmente, el producto C es desorbido (Figura 2). La secuencia de la reacción es así:

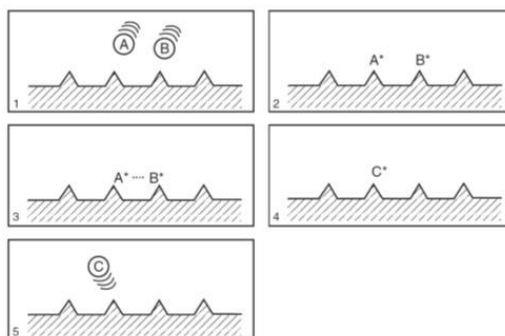
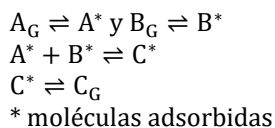


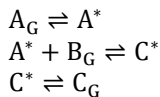
Figura 2. Mecanismo de Langmuir-Hinshelwood [59]

La velocidad de la reacción entre las dos moléculas adsorbidas para obtener el producto C, se representa mediante la ecuación (1), donde r_{eff} es la velocidad de reacción efectiva; p_A, p_B, p_C es la presión parcial del gas de cada molécula; θ_A, θ_B es el grado de cobertura del material de inicio; K_A, K_B es la constante de equilibrio de adsorción del gas y k es la constante de velocidad de reacción.

$$r_{eff} = \frac{dpc}{dt} = k\theta_A\theta_B = \frac{kK_A p_A K_B p_B}{(1+K_A p_A + K_B p_B)^2} \quad (1)$$

El mecanismo de Langmuir-Hinshelwood ha sido aplicado para muchas reacciones, incluidas algunas realizadas a escala industrial, por ejemplo: oxidación de CO en catalizadores de Pt, síntesis de metanol en catalizadores de ZnO, hidrogenación de etileno en catalizadores de Cu, reducción de N₂O con H₂ en catalizadores de Pt u Au y oxidación de etileno a acetaldehído en catalizadores de Pd [59].

- *Mecanismo de Eley-Rideal.* En este mecanismo, solo una de las moléculas de reacción gaseosa (como A) es quimisorbida. La molécula A reacciona en su fase activa con el material de inicio B en fase gaseosa, para obtener el producto quimisorbido C. En la etapa final, el producto es desorbido de la superficie del catalizador. La secuencia de reacción es así:



En este caso, solo el grado de cobertura del gas A es decisivo para la cinética de la reacción, y sobre la base de la isoterma de Langmuir, se puede formular la ecuación (2) para calcular la velocidad de la reacción:

$$r_{eff} = k\theta_A p_B = k \frac{K_A p_A}{(1+K_A p_A)} p_B \quad (2)$$

Existen varios ejemplos a nivel industrial de reacciones que siguen el mecanismo de Eley-Rideal, tales como: reducción de CO₂ con H₂, oxidación de amoníaco en catalizadores de Pt, hidrogenación de ciclohexeno e hidrogenación selectiva de acetileno en catalizadores de Ni o Fe [59].

Los dos mecanismos mencionados anteriormente son relativamente sencillos. Sin embargo, en la literatura se describen hasta cien mecanismos diferentes y sus ecuaciones de velocidad de reacción. Según Hagen [59], el conocimiento del mecanismo de una reacción catalizada de forma heterogénea es fundamental para obtener relaciones funcionales entre la velocidad de reacción y las variables del proceso catalítico. En muchos casos, una ecuación de velocidad de reacción empírica que describa la influencia de las variables más importantes con suficiente precisión en el rango operativo elegido es necesario. El modelado matemático de la cinética de reacción sobre la base de métodos estadísticos permite elegir entre modelos y obtener la mejor expresión de velocidad de reacción posible.

3.4 Desactivación del catalizador

Todos los catalizadores sólidos se desactivan durante su uso. Algunos lo hacen rápidamente, en segundos como es el caso de los catalizadores utilizados para el craqueo catalítico, y otros tardan años para desactivarse lo suficiente para parar el proceso en el cual actúan, como ocurre con los catalizadores de Fe promovidos en la síntesis del amoníaco [64]. El conocimiento detallado de los mecanismos de desactivación es fundamental para prevenir fallas en el funcionamiento o en la operación de reactores a nivel de planta industrial, que pueden conducir a una desactivación imprevista y frecuentemente irreparable. Existen diferentes causas para que un catalizador experimente la desactivación, a continuación, se describen:

- *Envenenamiento.* Es una quimisorción fuerte de reactivos, productos o impurezas encontradas en la alimentación del reactor que ocupan sitios activos disponibles para la catálisis. La quimisorción de agentes venenosos puede ser reversible o irreversible.
- *Sinterización.* Ocurre usualmente cuando se opera a altas temperaturas en el reactor, debido a que las partículas de la fase activa se aglomeran reduciéndose el área activa. Estos procesos de sinterización suelen ser acelerados cuando existe la presencia de vapor de agua.
- *Ensuciamiento.* Se da por la formación de depósitos de carbono o de otro material sobre la superficie, bloqueando los sitios activos.
- *Sublimación.* Cuando los agentes catalíticos dispersos en el soporte subliman a causa de los puntos calientes a lo largo del catalizador.
- *Envejecimiento.* Es debido a los largos periodos de uso del catalizador, ya sea por cambios graduales en la estructura cristalina o por pérdidas del material catalítico.

3.5 Métodos de caracterización del catalizador

Existen diferentes técnicas que permiten caracterizar los catalizadores, con el fin de identificar tres aspectos fundamentales: la composición y estructura química, la textura y propiedades mecánicas, y su actividad catalítica.

Respecto al primer aspecto, consiste en el estudio de la composición elemental, estructura y proporciones de las fases individuales presentes, la composición superficial, la naturaleza y proporciones de los grupos funcionales que pueden estar presentes en la superficie. Respecto al segundo factor, la textura cubre el análisis de la morfología y la estructura geométrica del catalizador, abarcando desde macro hasta micro escalas. Determina la forma y tamaño de las unidades de catalizador (partículas individuales, pellets, etc.); estructura de poro, área superficial total, la disposición de las fases individuales entre sí. El estudio de las propiedades mecánicas se refiere a aquellas que son de importancia a nivel industrial, tales como: resistencia a la abrasión, dureza y resistencia al choque térmico. Finalmente, con relación al tercer factor, la actividad catalítica es una medida cuantitativa de la habilidad de un catalizador de acelerar una reacción química bajo condiciones específicas. Se refiere a la velocidad de reacción, o alguna cantidad relacionada con la velocidad de reacción por unidad de cantidad de catalizador, además de incluir la selectividad de productos [64].

A continuación, se describen los métodos más comunes para caracterizar diferentes tipos de catalizadores. Es importante resaltar que una caracterización adecuada, requiere del uso en conjunto de varias técnicas complementarias, si se quiere tener una apreciación más completa de sus características.

- *Área de superficie específica.* Se refiere al área de superficie total por una unidad de volumen o masa, además, permite determinar el volumen total de poros y el diámetro promedio de los poros de los catalizadores [66]. Se obtiene por medio de medidas de adsorción física (fisisorción) por el llamado método BET, desarrollado por Brunauer, Emmet y Teller. Este se basa en la medida de sucesivos volúmenes de un gas no polar, generalmente nitrógeno o gases nobles, adsorbidos sobre la superficie interna de los poros del sólido a la vez que se mide la presión de las moléculas que se adsorben, hasta lograr la saturación de la superficie [64].
- *Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS).* Es una herramienta poderosa que permite determinar la composición atómica, estructura electrónica y estado de oxidación de los compuestos que forman parte del catalizador. Se ha aplicado con éxito a gases y sólidos y más recientemente a soluciones y líquidos. Sin embargo, la aplicación más importante y valiosa de dicha técnica es el análisis cualitativo de la superficie de sólidos, como metales, aleaciones, semiconductores y catalizadores heterogéneos [67]. Desde el punto de vista cuantitativo, la espectroscopia electrónica es una técnica para el análisis químico de la superficie del catalizador, determinando el porcentaje de elementos químicos en la superficie del mismo mediante el uso de fotoelectrones. Los fotoelectrones exhiben niveles de energía característicos, revelando la naturaleza de los elementos químicos en las muestras que se examinan. Los fotoelectrones solo pueden escapar de las capas atómicas más altas del sólido (una profundidad de 10 nm o menos) porque sus energías son relativamente bajas (generalmente 20-2000 eV) [68].
- *Microscopía electrónica.* Es útil para determinar el tamaño de los cristallitos metálicos soportados y cambios en su tamaño, forma y posición con el uso del catalizador [64]. Existen tres tipos de microscopía: de transmisión (TEM), de barrido o scanning (SEM) y una combinada (STEM) [67]. La técnica SEM se ha usado principalmente para examinar la topología de la superficie del catalizador y la morfología de las partículas y los cristales [69]. Cuando se adiciona un espectrofotómetro de energía dispersiva de rayos X (EDX) de Litio a un microscopio electrónico de barrido SEM, se obtiene un versátil y poderoso instrumento para el estudio de estructuras a escala micrométrica, que proporciona un espectro con la composición química de la superficie observada [70].
- *Difracción de rayos X (XRD).* Los patrones de XRD son importantes para identificar estructuras cristalinas específicas o planos dentro de un catalizador complejo. El tamaño promedio de un cristal se puede determinar por la anchura de un pico de difracción medida a la mitad de la altura. El ancho de la línea es inversamente proporcional al tamaño del cristal, y puede ser usado para dar el tamaño microcristalino en el intervalo de 5 a 50 nm, dependiendo del patrón, naturaleza del material, concentración y características del aparato [70].
- *Análisis térmicos.* Es un grupo de técnicas analíticas que miden cambios en las propiedades de los catalizadores en función de la temperatura. Dichos cambios en las propiedades incluyen dimensiones, masa, fase y comportamiento mecánico. Los métodos de análisis térmico son relativamente simples porque cambiar la temperatura de una muestra es menos complicado que analizar una muestra utilizando rayos X de alta energía, electrones o haces de iones en técnicas de espectroscopia [68]. Se han desarrollado diversas técnicas de análisis térmico, las más utilizadas para la caracterización de materiales catalíticos son: termogravimetría (TG), análisis térmico diferencial (DTA), calorimetría diferencial de barrido (DSC) y desorción a temperatura programada (TPD) [64].

3.6 Catalizadores utilizados en la gasificación

El uso de catalizadores en la conversión termoquímica de la biomasa puede no ser esencial, pero puede ayudar a mejorar el proceso o el producto obtenido. Algunas de las razones importantes para la utilización de catalizadores son: la eliminación del alquitrán en el gas de síntesis, reducción del contenido de metano o gases indeseables y aumento de la producción de hidrógeno. La elección de los catalizadores se debe hacer teniendo en cuenta su uso objetivo y práctico, se sugiere tener en cuenta su efectividad, resistencia a la desactivación, fácil regeneración y costo [23]. Los catalizadores pueden trabajar en reacciones *in-situ* y post-gasificación. El primero puede implicar la impregnación del catalizador en

la biomasa antes de la gasificación, se puede agregar directamente en el reactor, como en un lecho fluidizado. Dicha aplicación es eficaz para reducir el alquitrán, pero no es eficaz para reducir el metano [71]. En la post-gasificación, los catalizadores se colocan en un reactor secundario aguas abajo del gasificador para convertir el alquitrán y el metano formado. Esto tiene la ventaja adicional de ser independiente de la condición de operación del gasificador [23]. Los catalizadores en la gasificación de biomasa se dividen en tres grupos según su composición: alcalinos, alcalino-térreos y de transición.

3.6.1 Catalizadores de metales alcalinos

Son utilizados ampliamente para la eliminación del alquitrán y mejorar la calidad del gas producido. A menudo se agregan directamente a la biomasa mediante mezclado en seco o impregnación húmeda, en este último caso, el catalizador es difícil de recuperar y esto no siempre es rentable para el proceso de gasificación [71]. Dentro de ellos se encuentra el carbonato de potasio y el carbonato de sodio, importantes en la gasificación de la biomasa como catalizadores primarios. A diferencia de la dolomita, pueden reducir el metano en el gas de síntesis a través de una reacción de reformado. Muchos tipos de biomasa tienen potasio inherente en sus cenizas, por lo que pueden beneficiarse de la acción catalítica del potasio con una producción reducida de alquitrán. Sin embargo, el potasio es conocido por la aglomeración en lechos fluidizados, lo que contrarresta su beneficio catalítico [23].

Los metales alcalinos son los elementos más activos en la gasificación catalítica [72]. Los autores coinciden en que la actividad de los metales alcalinos incrementa al aumentar el peso atómico de los mismos [73]. Uno de los más representativos es el potasio [74], que actúa como un ácido de Lewis, colocando en contacto el carbono con el agente gasificante que contiene un solo par de electrones (como CO_2 , H_2O , O_2) [75]. Chen y Yang [76] encontraron que la presencia de un átomo electropositivo como el potasio, puede incrementar la densidad electrónica de los átomos de carbono; volviendo su carga atómica más negativa.

La difusión del potasio a través del carbono presente en la biomasa es rápida, lo que a veces se denomina "alta movilidad" en la gasificación catalítica [77]. La alta dispersión, debido a la rápida difusión del potasio produce una formación de microporos [78], que aumentan la velocidad de reacción, puesto que, la velocidad es proporcional al área de superficie del carbono [79]. Además, la creación de canales expone más átomos de carbono con los cuales el agente gasificante puede reaccionar [80]. Los precursores de potasio más comunes son K_2CO_3 y KOH , pero ninguno de estos son las fases activas del potasio durante la gasificación. El potasio también puede promover la gasificación a través de la intercalación, particularmente en materiales de carbono grafiticos [81]. La intercalación aumenta la porosidad y la superficie expuesta [82], la movilidad del potasio le permite intercalarse más que otras especies, incluido el sodio [83]. La descomposición del precursor de K metálico mejora la intercalación, ya que los átomos de K individuales penetran entre las capas de grafito más fácilmente que los precursores moleculares más grandes [84].

Una desventaja con la gasificación catalizada por K es la volatilidad de las especies de potasio, la alta volatilidad del KCl , así como la menor actividad en comparación con KOH o K_2CO_3 , limita su uso como un precursor de potasio [77]. La liberación de KCl en fase gaseosa durante la gasificación puede conducir a la corrosión del gas [85], vapores tóxicos, incluyendo CH_3Cl [86], escoria y ensuciamiento [24]. Otros precursores de potasio como K_2CO_3 y KOH (y sus productos de descomposición) aunque presentan una mayor actividad catalítica también son volátiles [87]. Otra desventaja es la desactivación del potasio como catalizador, es que el K reacciona con el Al y el Si presentes en la biomasa para formar aluminosilicatos de potasio estables y no reactivos, tales como kaliofilita (KAlSiO_4), terminando así el ciclo catalítico [88].

Como resultado, las biomásas con alto contenido de cenizas requieren mayores cantidades de potasio para compensar la formación de los compuestos de aluminosilicato [89]. Chen y Yang [90] estudiaron el efecto de átomos de litio, sodio y potasio al formar grupos C-O-M (donde la M representa el metal), encontrando que la carga neta de los átomos de carbono de los bordes cambia sustancialmente al ganar densidad electrónica desde el elemento metálico, y la actividad catalítica de estos metales puede ser correlacionada con su capacidad de donar electrones y cambiar la carga neta de los átomos de carbono del borde. El orden de actividad catalítica sugerido es: $\text{K} > \text{Na} > \text{Li}$. Este orden fue sugerido teniendo en cuenta el cambio en la carga que experimenta el sitio activo donde se va a quimisorber posteriormente el oxígeno.

3.6.2 Catalizadores de metales alcalinos-térreos

La dolomita (CaCO_3 , MgCO_3) es muy efectiva para la eliminación del alquitrán, es económica y existe en abundancia, obviando la necesidad de regeneración del catalizador. Se puede usar como catalizador primario mezclado con la biomasa o como catalizador secundario en un reactor aguas abajo, que también se denomina lecho de protección. La dolomita calcinada es significativamente más efectiva que la dolomita cruda, es muy útil para la conversión de metano, su actividad catalítica es mayor con el dióxido de carbono que con el vapor [71]. La composición química de la dolomita varía de una fuente a otra, pero generalmente contiene 30% de CaO , 21% de MgO y 45% de CO ; también contiene trazas de minerales como SiO , FeO y AlO . Las áreas de superficie de los diversos tipos de dolomita también difieren, al igual que los tamaños y las distribuciones de poros [91].

Los compuestos de calcio no son tan activos como los metales alcalinos, debido a su movilidad más baja (i.e. poca difusividad) [92], aunque asegurar una alta dispersión del calcio antes de la gasificación puede conducir a velocidades de reacción comparables como la gasificación catalizada por álcalis [93]. La actividad catalítica del Ca disminuye con conversiones más altas y se desactiva por sinterización [94]. Sin embargo, es muy utilizado por la captura de CO₂ [95]. Como el CO₂ no puede oxidarse más, el uso de un adsorbente para eliminar el CO₂ aumenta el poder calorífico del gas de síntesis producido [96]. El CaO adsorbe el CO₂ del *syngas* para formar CaCO₃, aumentando la concentración de H₂ y CO, y reduciendo la necesidad de un proceso de limpieza posterior [97]. El Ca permite una mayor velocidad de reacción, mayor producción de CO y energías de activación similares a un proceso no catalizado. Sugiriendo entonces que el rol del catalizador en esta reacción es incrementar el número de complejos oxigenados en la superficie (aumentando la velocidad de la reacción) sin variar significativamente la energía de activación [98].

Catalíticamente, el CaO mejora las reacciones de conversión agua-gas y reformado de metano con vapor [12], así como la ruptura de cadenas orgánicas [99]. Además, los catalizadores a base de calcio rompen los alquitranes [100], lo que aumenta aún más la concentración de productos deseables. De hecho, se ha agregado calcio a los catalizadores en los que la formación de coque es un problema, como el craqueo en el petróleo, para promover la gasificación del coque que de otra manera bloquearía los sitios activos [101]. Existen otras ventajas del Ca en la gasificación; se ha demostrado que el CaO adsorbe otras especies, incluido el azufre, lo que limita la liberación de H₂S en el gas de síntesis [102]. De igual forma, para biomásas con alto contenido de nitrógeno atómico, el CaO promueve la formación de N₂ inerte durante la combustión y la gasificación [103].

Además, los iones de Ca se intercambian con iones de Fe o Mg en estructuras minerales de biomasa a 600-850 °C mediante una reacción de sustitución [104]. Como desventajas, sumado a la desactivación por sinterización, la gasificación catalizada por Ca conlleva a la formación de eutécticos de bajo punto de fusión entre varias especies minerales y calcio, que pueden conducir a escorias y taponamientos en el reactor [92]. Adicional, el Ca presenta una disminución en la reactividad después de alcanzar el 20% de la conversión; debido probablemente a la aglomeración de las partículas de CaO y por consiguiente ocurre una pérdida de contacto efectivo entre estas partículas de CaO y el material carbonoso [21].

Al igual que el calcio, el magnesio es un metal alcalinotérreo, pero catalíticamente menos activo [72]. Alarcón et al. [105] atribuyen la diferencia catalítica al hecho de que las temperaturas de descomposición de Mg(OH)₂ (332 °C) y MgCO₃ (350 °C) son mucho más bajas que las de Ca(OH)₂ (512 °C) y CaCO₃ (825 °C). Luego de la descomposición, se forma MgO y es relativamente estable, de modo que no se produce un ciclo catalítico. Algunos estudios no reportan actividad catalítica para el Mg, mientras que otros refieren alguna actividad, pero menor a la de los catalizadores mencionados anteriormente [106]. Sin embargo, el Mg tiene características beneficiosas similares al Ca, como la capacidad de absorción del CO₂ [107]. Sin embargo, el MgO es incapaz de actuar en las condiciones de gasificación, por lo que los compuestos de magnesio se utilizan principalmente como adsorbentes de CO₂ después de la gasificación (post-gasificación) a 200-300 °C y presión atmosférica [88].

3.6.3 Catalizadores de metales de transición

El níquel se desempeña mejor cuando se usa aguas abajo del gasificador en un reactor secundario, generalmente a 740 °C hay un aumento en el contenido de hidrógeno y monóxido de carbono del gas que sale, con la eliminación o reducción del contenido de hidrocarburos y metano [71]. A temperaturas más bajas, la reacción de metanación se favorece termodinámicamente y, a veces, se optimiza en los casos en que se desea el metano como componente predominante del gas final [108]. El níquel es relativamente barato y está disponible comercialmente, aunque no es tan barato como la dolomita y presenta problemas de desactivación por depósitos de carbono en su superficie. Es importante combinarlo con un soporte apropiado para un rendimiento óptimo [23].

La velocidad de reacción con níquel o hierro es más baja que la del potasio [72]. Por lo tanto, estas especies son más interesantes en los casos en que están presentes en la materia prima, como el Fe en el carbón [109] o el Ni en el coque de petróleo [110]. El hierro se puede obtener a bajo costo como un catalizador de desecho de una serie de procesos mecánicos, así que el bajo costo compensa su menor actividad [111]. La mayor actividad del K obedece a la facilidad de dispersión dentro de las partículas, contrario al Fe que permanece en la superficie de las mismas [87]. El hierro promueve la formación de poros más grandes (mesoporos) que el potasio (microporos) [112]. La formación de poros más grandes crea menos área de superficie, y como la velocidad de gasificación es proporcional al área de superficie, la velocidad con hierro es menor. El comportamiento del hierro ha sido comparado con el del calcio, tanto el Ca como el Fe convierten el H₂S en compuestos no tóxicos [82], pero el hierro es menos activo que el calcio y convierte el nitrógeno en HCN y NO₂ tóxicos, mientras que el calcio promueve la formación de N₂ inerte [113]. Algunos investigadores sugieren usar hierro y calcio como co-catalizadores, ya que su combinación conduce a una formación reducida de alquitrán y una alta estabilidad del catalizador [114]. Recientemente, Domazetis et al. [115] indicaron que, para la gasificación catalítica con vapor de agua, el grupo Fe-C era el sitio activo del material carbonizado donde las moléculas de agua se quimisorben para formar el enlace de coordinación Fe-OH₂, seguidamente se da la desorción de H₂ vía complejos tipo hidruros.

De otra parte, el Ni puede prevenir la liberación de compuestos de azufre en la fase de vapor durante la gasificación a través de la formación de Ni_3S_2 [116]. Dos problemas con el níquel es que no puede adsorber el CO_2 producido durante la gasificación y que tiende a sinterizarse [110], una alternativa de solución es mezclarlo con un adsorbente de CO_2 como el CaO [117]. Se ha demostrado que el manganeso es más efectivo que el calcio en la degradación de celulosa a baja temperatura ($<300\text{ }^\circ\text{C}$) durante la torrefacción, y favorece la producción de hidrocarburos líquidos en oposición al H_2 durante la gasificación [118]. Sala et al. [119] reportaron que el zinc inhibió la formación de metano y que el aumento de la concentración de zinc condujo a rendimientos crecientes de la fracción de sólido y una disminución de líquidos y gases distintos al hidrógeno.

Los metales alcalinos tienen una mayor actividad que los metales de transición, y suelen ser más baratos. Como tal, la mayoría de los metales pesados suelen ser de interés cuando el metal está presente en la biomasa. Las actividades del níquel y el hierro son más sensibles al área de superficie y estructura inicial que los catalizadores alcalinos, pero estos catalizadores no se desactivan con la materia mineral como lo hacen los metales alcalinos [120]. Por lo tanto, los metales pesados o de transición pueden funcionar mejor en materias primas con alto contenido de minerales. Claude et al. [121] sugirió que el futuro primario de los metales pesados, como el níquel, como catalizadores de gasificación, se encuentra en el reformado del alquitrán en procesos aguas abajo. Finalmente, es comúnmente conocido que un requerimiento crítico para una gasificación efectivamente catalizada por un álcali o un alcalino-térreo es la presencia de un anión que contenga oxígeno, mientras que para metales de transición como Ni y Fe, deben estar preferiblemente en su estado metálico [122].

3.6.4 Estudios experimentales sobre gasificación catalítica de biomasa

El incremento del rendimiento de la gasificación, la reducción de gases o sustancias no deseadas en el *syngas* y la mejora en los costos de operación, conllevan a diferentes autores a desarrollar investigaciones en torno a la evaluación del efecto de los catalizadores, tipos de reactores y variables operativas en el proceso de gasificación de diversas materias primas. Shahbaz et al. [12] estudiaron el efecto de la temperatura, el tamaño de partícula, la relación de flujo CaO /biomasa y la ceniza de carbón en la producción de hidrógeno y gas de síntesis mediante gasificación de cuesco de palma, utilizando un TGA-MS y en un reactor de lecho fluidizado a escala piloto. Encontraron que la producción de hidrógeno es muy sensible a la temperatura y el porcentaje de cenizas de carbón. En el caso del gas de síntesis, el orden de la influencia paramétrica es: CaO /biomasa $>$ % cenizas de carbón $>$ temperatura $>$ tamaño de partícula.

El efecto catalítico de las cenizas de carbón se debe a la presencia de Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 y CaO , según lo demuestra el análisis XRF aplicado. El Fe_2O_3 y MgO promueven la ruptura de cadenas orgánicas y alquitranes, lo que aumenta aún más la concentración de productos deseables [123]. La presencia del metal alcalino aumenta la velocidad de gasificación de algunas reacciones de producción de H_2 , como la reacción de conversión agua-gas y la reacción de reformado de metano. Finalmente, una temperatura de $692\text{ }^\circ\text{C}$, ceniza de carbón de $0,07\%$ (p/p), CaO /biomasa de $1,42$ y un tamaño de partícula de $0,75\text{ mm}$ son las condiciones óptimas para un rendimiento máximo de hidrógeno y gas de síntesis de $36,89$ y $61,92\%$ en TGA-MS, y $37,52$ y $62,59\%$ a escala piloto, respectivamente.

Mastuli et al. [69] evaluaron diferentes catalizadores como Ni, Cu y Zn soportados en MgO en la gasificación de hojas de palma de aceite con agua supercrítica, la fase activa representó el 20% (p/p) de la masa total del catalizador. El área de superficie específica de estos catalizadores se puede organizar en el orden de $20\text{NiO}/\text{MgO}$ ($30,1\text{ m}^2/\text{g}$) $>$ $20\text{CuO}/\text{MgO}$ ($16,8\text{ m}^2/\text{g}$) $>$ $20\text{ZnO}/\text{MgO}$ ($13,1\text{ m}^2/\text{g}$). Aunque los catalizadores con un área superficial específica mayor son beneficiosos para las reacciones catalíticas, en este estudio, el área superficial específica más grande no condujo al rendimiento catalítico más alto. Se obtuvo que el catalizador $20\text{ZnO}/\text{MgO}$ mostró el rendimiento de H_2 más alto. Además, estos catalizadores también mostraron una mayor selectividad de H_2 alcanzando $83,8\%$, $84,9\%$ y $87,6\%$ (v/v) para los catalizadores $20\text{CuO}/\text{MgO}$, $20\text{NiO}/\text{MgO}$ y $20\text{ZnO}/\text{MgO}$, respectivamente.

En el estudio el $20\text{ZnO}/\text{MgO}$ logró la mejor dispersión y el mayor tamaño del cristalito, lo cual promovió una mayor carga del ZnO sobre el material de soporte MgO ($17,8\%$). El rendimiento del H_2 aumentó con el uso de catalizadores, debido a que los catalizadores soportados promueven la reacción de conversión agua-gas y suprimen la reacción de metanación, siendo el Zn el catalizador más activo en dicha reacción. Sin embargo, el estudio de Sivasangar et al. [124] mostró una leve caída en el rendimiento del H_2 con la utilización del NiO soportado en CaO en comparación con el catalizador no soportado de CaO , puesto que la velocidad de reacción con Ni es más baja que para otros catalizadores metálicos como el potasio, debido a que el Ni tiende a sinterizarse durante la gasificación. Una ventaja del uso del Ni es la reducción de compuestos de azufre a través de la formación de Ni_3S_2 [116].

De igual forma, Ismail et al. [125] estudiaron la actividad catalítica del CaO y MgO con diferentes tamaños de partícula (bulto y nano) para la producción de hidrógeno a partir de la gasificación de raquis de palma, encontrando que el MgO de tamaño nano produjo el rendimiento más alto de H_2 en comparación con el CaO del mismo tamaño, debido a una reacción de conversión agua-gas más activa y su estabilidad durante la gasificación. Un beneficio importante del uso de metales alcalinotérreos como el MgO y el CaO en la catálisis es la absorción de CO_2 en el proceso termoquímico, aumentando así el rendimiento del H_2 en el gas de síntesis [126].

Respecto al estudio de Mastuli et al. [69] se identificó que el catalizador 20ZnO/MgO alcanzó un rendimiento de H₂ casi un 200% más alto que la reacción no catalizada, infiriendo que la buena dispersión de las partículas de ZnO sobre el MgO según los resultados del FESEM permitió un mayor número de reacciones catalíticas. Además, la basicidad y la resistencia básica de los catalizadores también influyeron en el rendimiento de H₂. Según Koo et al. [127], los catalizadores básicos promueven la reacción de conversión agua-gas, aumentan la capacidad de absorción de CO₂ y reducen la formación de compuestos alquitranados; y los catalizadores ácidos tienen una mayor tendencia a facilitar la producción de CH₄ a través de reacciones de metanación. El catalizador 20ZnO/MgO tiene una basicidad relativamente similar al MgO y más baja que los catalizadores 20NiO/MgO y 20CuO/MgO. Sin embargo, posee una resistencia básica mayor demostrando que este parámetro es más significativo que la basicidad para aumentar la producción de H₂, debido a que hace más estable la unión de cada molécula del catalizador a altas temperaturas, evitando su desactivación durante la gasificación catalítica. Otro resultado importante fue lo arrojado por el análisis XPS, el catalizador 20ZnO/MgO tiene la mayor energía de enlace en comparación con los otros catalizadores soportados, lo cual evidencia que la nube de electrones de Mg en el catalizador basado en Zn tiene fuerzas de atracción más fuertes hacia el núcleo del oxígeno que genera una mayor estabilidad del catalizador y por tanto logra mayores actividades catalíticas; en el mismo análisis se observó que el catalizador 20ZnO/MgO presenta un solo estado de oxidación comparado con los catalizadores 20NiO/MgO y 20CuO/MgO que tienen dos estados de oxidación, concluyendo que el estado de oxidación de los materiales activos controlan el rendimiento catalítico en la gasificación.

Waheed et al. [128] estudiaron la producción de hidrógeno a partir de la gasificación catalítica del bagazo de caña de azúcar a temperaturas entre 750 y 1050 °C, caudal de vapor de 6 a 25 ml/h y diferentes catalizadores como: Ni-dolomita, Ni/MgO y Ni/Al₂O₃, todos con un 10% (p/p) de carga de níquel. El rendimiento de hidrógeno sin catalizador a 950 °C fue de 100,97 mmol/g de bagazo. Sin embargo, la presencia de los catalizadores Ni/MgO y Ni/Al₂O₃ produjeron rendimientos de hidrógeno significativamente mejorados de 178,75 y 187,25 mmoles/g de bagazo, respectivamente a 950 °C. La temperatura óptima para obtener el rendimiento de hidrógeno más alto (187,25 mmol/g de bagazo) fue de 950 °C. La influencia del flujo de vapor mostró que con el aumento de 6 a 15 ml/h, el rendimiento de hidrógeno aumentó de 187,25 a 208,41 mmol/g de bagazo. Está claro que la presencia de catalizadores mejoró significativamente el rendimiento de H₂ durante la gasificación, el uso de Ni/dolomita incrementó ligeramente el rendimiento de H₂.

Sin embargo, los catalizadores Ni/MgO y Ni/Al₂O₃ generaron un aumento marcado en el rendimiento de H₂, debido a la mayor área de superficie de estos catalizadores 53,90 y 76,82 m²/g, respectivamente (lo que indica una mayor dispersión de metales en la superficie del catalizador). Sumado a un volumen de poro significativamente alto en comparación con el catalizador Ni/dolomita. Maiti et al. [129] investigaron la gasificación de la biomasa de cedro y bambú, encontrando que la presencia de metales alcalinos y alcalinotérreos, especialmente potasio, influyó fuertemente en la conversión y reactividad de las muestras al catalizar las diversas reacciones de conversión de carbono. Otto y Shelef [130] también confirmaron el efecto catalítico de varios metales como Pt, Rh, Ru y Pd, informaron que la adición de estos catalizadores mejoró significativamente la tasa de gasificación. El *biochar* del bagazo presentó un contenido significativo de cenizas (9,44% p/p), conformadas por metales alcalinos y alcalinotérreos, incluidos el CaO y el K₂O, que se suman a la actividad catalítica de los catalizadores a base de Níquel analizados en el estudio.

Peng et al. [22] analizaron la gasificación de residuos de madera en un lecho fluidizado utilizando dos tipos de catalizadores metálicos (Ni/Al₂O₃ y Ni/CeO₂/Al₂O₃) con diferentes porcentajes (20, 30 y 40% p/p), tres tiempos de residencia (20, 40 y 60 min) y tres temperaturas de gasificación (750, 825 y 900 °C). También se llevaron a cabo experimentos no catalíticos para determinar las condiciones óptimas para el craqueo de alquitrán y la producción de hidrógeno/gas de síntesis. Los resultados revelaron que la alta temperatura (900 °C) y la alta carga de catalizador (40% p/p) son favorables para el craqueo de alquitrán y la producción de hidrógeno de alta pureza. También se encontró que, durante un tiempo de residencia de 60 minutos, el craqueo de alquitrán en presencia de Ni/CeO₂/Al₂O₃ es 196% más que el craqueo sin ningún catalizador, mientras que en presencia de Ni/Al₂O₃ se reduce a 162%. Finalmente, los experimentos demostraron que Ni/CeO₂/Al₂O₃ es más adecuado para la conversión de biomasa y producción de hidrógeno que Ni/Al₂O₃.

En el proceso de gasificación se busca reducir el contenido de alquitranes en el producto final, puesto que, genera graves problemas operativos y bloquea las tuberías. Las temperaturas más altas promovieron un craqueo del alquitrán y por ende un aumento del rendimiento del gas de síntesis, basado en el principio de Le Chatelier, este sugiere que las temperaturas altas favorecen a los productos en las reacciones endotérmicas, una de estas reacciones es el reformado del metano y el craqueo del alquitrán [131]. Los resultados también muestran que la actividad catalítica de Ni/CeO₂/Al₂O₃ para la reformación de los alquitranes y *char* es mayor comparada con la de Ni/Al₂O₃. Este fenómeno se debe al aumento en el área de superficie del Ni/CeO₂/Al₂O₃ debido a la sinterización de CeO₂ durante el proceso. De igual forma, la influencia de los catalizadores en la reducción del alquitrán es más significativa a temperaturas más altas, debido a que el aumento de la temperatura en presencia de un catalizador conduce a una definición menos homogénea de la muestra, así como a una mayor cantidad de formaciones de superficie lisa del soporte [132]. El alquitrán es una mezcla compleja de hidrocarburos pesados, como los hidrocarburos aromáticos

policíclicos (fenol, tolueno, benceno, naftaleno, antraceno y componentes aromáticos de un solo anillo). Dado que la composición del alquitrán es extremadamente compleja, los trabajos experimentales seleccionan uno o dos compuestos para modelar el alquitrán, como tolueno y naftaleno [133], pero pocos estudios experimentales consideran el fenol como un componente del alquitrán, siendo uno de los componentes más importantes del mismo [134]. En el estudio se evidenció que el fenol, el naftaleno y los compuestos aromáticos son muy resistentes al craqueo en presencia de Ni/Al₂O₃ en comparación con otros componentes; sin embargo, la fracción de masa de estos componentes se ve más afectada por el catalizador Ni/CeO₂/Al₂O₃. Sun et al. [135] encontraron que los compuestos pesados de alquitrán se descomponen en compuestos ligeros a temperaturas de reacción de 500-600 °C. Sin embargo, el craqueo térmico y el reformado del naftaleno, fenol y compuestos aromáticos se realizan a temperaturas más altas (700-800 °C).

Mohamad et al. [136] estudiaron el efecto del Fe y el Ni soportados en una zeolita (BEA) como catalizadores en el proceso de gasificación del cuesco de palma en un reactor de lecho fijo, la gasificación se realizó en reactores de dos etapas para evaluar el efecto de la temperatura de calcinación y la relación de flujo vapor:biomasa en la composición del gas producido. El rango óptimo para la relación vapor:biomasa se encuentra entre 2 y 4. El exceso de contenido de vapor da como resultado una caída de temperatura en el gasificador que no es deseable para las reacciones de gasificación. El gas producido está conformado por 70,5% hidrógeno, 27,7% dióxido de carbono, 2,4% monóxido de carbono y 1% metano. La temperatura de calcinación tiene un efecto sobre el rendimiento de los catalizadores de Ni/BEA y Fe/BEA en la gasificación del cuesco de palma, puesto que la actividad catalítica disminuye al aumentar la temperatura de calcinación. En el caso del catalizador Ni/BEA mostró poca disminución en el área superficial cuando el catalizador se calcinó a 500 y 600 °C, sin embargo, el área superficial disminuyó significativamente cuando el catalizador se calcinó a 700 °C, la mayor formación de H₂ se obtuvo en presencia de Ni/BEA (500 °C). La baja reducción en el área superficial de Ni/BEA a menores temperaturas de calcinación se debe a la naturaleza hidrofóbica del alto contenido de sílice en presencia de especies metálicas de Ni [137].

De otra parte, cuando solo se usó BEA, la formación de H₂, CO y CH₄ en la corriente del producto aumentó ligeramente, mientras que la formación de CO₂ disminuyó; el desempeño favorable de BEA en la gasificación se puede asociar a sus propiedades de textura, con un área de superficie alta y un diámetro medio de poro más pequeño que el de los catalizadores preparados. Estas características son producto de la naturaleza ácida de las sales metálicas utilizadas para la impregnación que atacaron la abertura del poro del soporte, lo que lleva a un tamaño de poro mayor y una deformación de la superficie continua en una superficie más pequeña no continua [138]. Respecto al catalizador Fe/BEA, la producción máxima de hidrógeno se logra cuando se calcina a 600 °C, se sugiere que Fe/BEA (600) promueve la reacción de reformado de metano en lugar de la reacción de conversión agua-gas, lo cual pudo corroborarse con el bajo contenido de CH₄ en el gas final, infiriendo que el CH₄ producido fue reformado con vapor para producir CO e H₂, o se oxidó para producir CO y H₂O [139]. Según el análisis térmico el pico de reducción a temperaturas más altas entre 650-800 °C corresponde a la reducción de las especies de hierro que tiene una fuerte interacción con el soporte, FeAl₂O₄. La fuerte interacción entre Fe-Al₂O₃ proporcionó la estabilización de la fase de FeO en Al₂O₃ [101], lo que mantuvo su actividad catalítica a altas temperaturas y por ende un mayor rendimiento en la producción de hidrógeno.

En el trabajo de Li et al. [140], estudiaron un conjunto de residuos del proceso de extracción de aceite de palma (i.e. cuesco, fibra, raquis) en un gasificador de lecho fijo con el fin de producir gas de síntesis, en el proceso incorporaron un catalizador trimetálico compuesto por nanopartículas de níquel, hierro y aluminio para evaluar su efecto en la calidad y poder calorífico del gas producido, también, estudiaron otros parámetros como temperatura (750-900°C), tasa de alimentación de biomasa (0,3-0,8 kg/h), tamaño de partícula (0,15-2 mm) y relación de flujo vapor:biomasa (0-2,67). Los experimentos demostraron que la temperatura era el factor más importante en este proceso, una temperatura más alta contribuyó a una mayor producción de hidrógeno y *syngas*, sin embargo, redujo el poder calorífico del mismo. Se encontró que la relación óptima vapor:biomasa es 1,33. También se demostró que un tamaño de partícula más pequeño era más favorable para la calidad y el rendimiento del gas.

Los resultados del análisis de composición elemental mostraron que los catalizadores tri-metálicos preparados tenían una estructura recubierta con una carga de óxido tri-metálico en catalizadores por encima del 21% (p/p), y el contenido de NiO, Fe₂O₃ y La₂O₃ en catalizadores preparados fue de 8,6%, 7,4 % y 5,9% (p/p), respectivamente. Las nanopartículas de óxido tri-metálico como componentes activos se ubicaron en la superficie del catalizador con un tamaño entre 28 y 35 nm y un área superficial mayor que los catalizadores comerciales basados en níquel. El catalizador NiLaFe/Al₂O₃ demostró un buen desempeño en la reducción de alquitranes e incremento en el rendimiento del gas, este desempeño se debió principalmente por el craqueo secundario de los vapores sobre los catalizadores, similar a lo reportado por Lv et al. [139] en otros catalizadores metálicos para la gasificación de biomasa con vapor. A partir de los cambios en la composición del gas, se pudo concluir que varias reacciones importantes como la reacción de conversión agua-gas y la reacción de reformado de hidrocarburos, ocurrieron en el reactor catalítico simultáneamente. Todas esas reacciones son favorables para la generación de hidrógeno, por lo que el contenido de H₂ en el gas aumentó significativamente, mientras que el hidrocarburo se consumió, lo que dio lugar a una fuerte reducción del contenido de CH₄ en comparación con el proceso de gasificación de residuos de aceite no catalizado.

4. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Una revisión detallada del material bibliográfico permite dar cuenta del avance y tendencias en el desarrollo tecnológico de la gasificación catalítica de biomasa. A continuación, se presenta un análisis bibliométrico para conocer la evolución histórica y los países que lideran la producción científica en el ámbito mundial. Para la obtención de los indicadores bibliométricos se realizó una búsqueda de las publicaciones científicas en la base de datos Scopus®, las ecuaciones booleanas se definieron a partir de las siguientes palabras claves: “*gasification*”, “*catalytic*”, “*biomass*”, “*in-situ*”, “*post-gasification*”. La búsqueda de publicaciones se acotó en el tiempo para el período 1970-2018.

En la Figura 3 se evidencia que la gasificación es un proceso estudiado ampliamente en los últimos 50 años, encontrando que durante la década de los 80 hubo un aumento significativo en la producción científica, producto del interés a nivel mundial por el desarrollo tecnológico de la industria del carbón [94], [141]. También se puede observar un incremento reciente del uso de catalizadores en la gasificación, siendo la catálisis dentro del reactor o *in-situ* el método más utilizado.

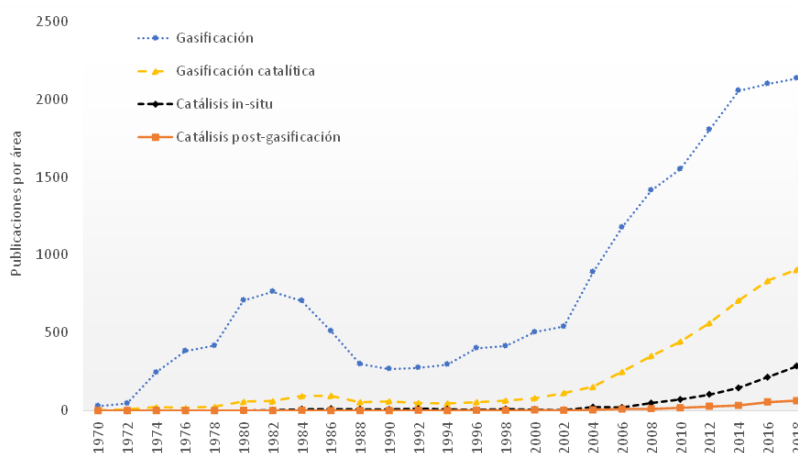


Figura 3. Evolución histórica de la producción científica en gasificación (Adaptado de Scopus)

En correspondencia con la figura anterior, la biomasa como materia prima en la gasificación ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos 20 años (Figura 4), generando un efecto directamente proporcional en la producción científica en la gasificación. Esto se debe al interés generalizado de diferentes países por buscar otras fuentes de energía renovables y amigables con el medio ambiente. En línea con la tendencia del uso de la biomasa se observa la utilización de catalizadores durante la gasificación de la misma, con el fin de mejorar los productos obtenidos del proceso u optimizar las condiciones de operación. De otra parte, similar a la figura anterior la catálisis al interior del gasificador es la técnica más estudiada con respecto a la catálisis aguas abajo o post-gasificación.



Figura 4. Evolución histórica de la producción científica en gasificación de biomasa (Adaptado de Scopus)

De otra parte, Estados Unidos y China se consolidan como los pioneros a nivel mundial en la producción científica en gasificación, agrupando juntos aproximadamente el 29,5% de las publicaciones en torno al tema. Respecto a Latinoamérica, Brasil se ubica en la primera posición y en el puesto 18 de 133 en el mundo; Colombia sigue a Brasil a nivel regional, ocupando el puesto 30 en el ranking mundial con una producción científica que equivale al 0,5% de la producción total (Figura 5). La tendencia de la gasificación a partir de biomasa no presenta gran variación solo que China supera a Estados Unidos; Colombia se mantiene en el segundo lugar a nivel regional y escala al puesto 28 en el mundo (i.e. 0,8% de la producción científica mundial).

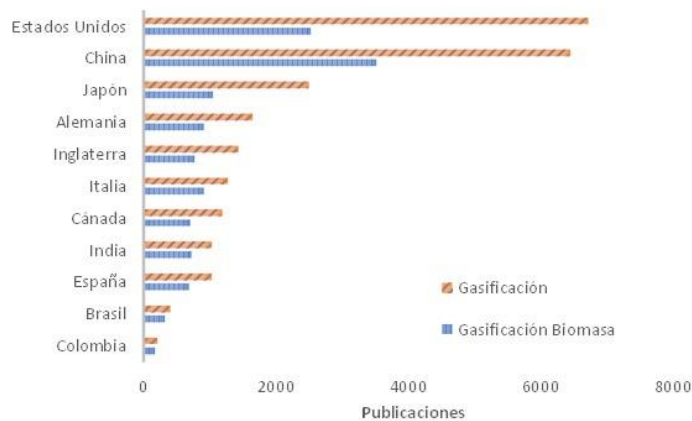


Figura 5. Producción científica por país (Adaptado de Scopus)

A nivel industrial existen más de 272 plantas de gasificación en funcionamiento que cuentan con 686 gasificadores a nivel mundial, y actualmente hay 74 plantas en construcción que tendrán un total de 238 gasificadores y producirán 83 MWth [142]. La distribución regional de la gasificación ha cambiado significativamente en los últimos cuatro años, las plantas de gasificación se habían distribuido de manera equitativa entre Asia/Australia, África/Medio Oriente y América del Norte. No obstante, la capacidad de gasificación (tanto operativa como en construcción) en la región de Asia/Australia ahora supera al resto del mundo en conjunto, siendo China el país con el mayor número de plantas de gasificación en funcionamiento. Los principales motores de este crecimiento actual y esperado son las industrias químicas, de fertilizantes y de carbón a líquidos en Asia (principalmente China, India, Corea del Sur, Malasia y Japón). De otra parte, el carbón es ahora la materia prima dominante y lo seguirá siendo en el futuro previsible. Todavía hay plantas de gasificación que utilizan petróleo como materia prima, pero ese número ha disminuido considerablemente a medida que ha aumentado el precio del petróleo crudo. Si bien la utilización de biomasa como materia prima es baja en la actualidad, se espera que crezca en el futuro [142].

5. CONCLUSIONES

La diversificación de la canasta energética, la reducción de gases efecto invernadero y la generación de energía en zonas no interconectadas en el país, hacen que se promueva el uso de fuentes renovables y más amigables ambientalmente, dentro de ellos, el hidrógeno despunta como el más indicado para motorizar el desarrollo humano en este siglo. De todas las energías primarias renovables que pueden usarse como punto de origen del hidrógeno, la biomasa constituye una alternativa promisoriosa en virtud de su potencial energético, disponibilidad, naturaleza distribuida y bajo costo de obtención. Uno de los procesos termoquímicos más utilizados en la industria para la transformación de biomasa es la gasificación, sin embargo, por la heterogeneidad de dicha materia prima se debe considerar la estandarización de múltiples variables operativas para que el proceso sea eficiente y viable económicamente.

Algunas de estas variables son la temperatura, agente gasificante, relación agente gasificante/biomasa, presión, entre otras. La temperatura, es considerada la variable más importante, ya que afecta los rendimientos de los productos y por ende la eficiencia del proceso, así como la calidad del gas, todo debido al comportamiento termodinámico de las reacciones y al equilibrio entre las reacciones endotérmicas y exotérmicas. El uso de aire como agente gasificante es bastante común en escalas demostrativas e industriales en virtud de su bajo costo. Además, permite un proceso exotérmico y por tanto la posibilidad de ser auto térmico, pero diluye el gas de síntesis en N₂ y con esto se disminuye el poder calorífico, cuando se emplea vapor de agua también se obtiene un gas de síntesis con menos contenido de N₂, con aumento de H₂ y un gas con poder calorífico aceptable en comparación con los gases combustibles tradicionales. No obstante, la gasificación con vapor es un proceso considerablemente más difícil de escalar, por el suministro de calor en los reactores a gran escala.

En cuanto a las tecnologías de gasificación, la gasificación en lecho fijo es utilizada a escalas menores, mientras que los de flujo arrastrado son aplicados en procesos de mayor capacidad. Los gasificadores de lecho fijo son de gran interés en la industria debido a su fácil fabricación y operación, además, generan bajo contenido de alquitranes. Sin embargo, presentan algunos problemas como taponamiento del reactor por la baja densidad de la biomasa. De otra parte, los catalizadores son fundamentales para aumentar el rendimiento del gas de síntesis y reducir el contenido de alquitranes y gases no deseados, lo cual afecta positivamente la economía del proceso, en el proceso de selección de los catalizadores se recomienda el siguiente orden de prioridad con el fin de mejorar la calidad del *syngas* y una mayor vida útil del mismo: selectividad > estabilidad > actividad. Existen diferentes causas para que un catalizador se desactive durante la gasificación, las más representativas son la sinterización debido a las altas temperaturas que se manejan en el proceso termoquímico y el envenenamiento por las impurezas que puede presentar la biomasa ocupando sitios activos disponibles para la catálisis.

Finalmente, en los catalizadores de metales alcalinos se destacan el potasio y sodio, utilizados ampliamente para la eliminación del alquitrán y mejorar la calidad del gas producido, sin embargo, su uso limita las temperaturas de operación de los gasificadores por la alta volatilidad de estos compuestos y la fundición del Na a temperaturas elevadas promoviendo la formación de costras. Dentro de los más representativos, se encuentra el carbonato de potasio y el carbonato de sodio, siendo el K_2CO_3 más efectivo que el Na_2CO_3 , en virtud de la movilidad del potasio que le permite intercalarse más que el sodio aumentando su porosidad y la superficie expuesta. Respecto a los catalizadores de metales alcalino-térreos los más importantes son el calcio y el magnesio, estos compuestos no son tan activos como los metales alcalinos debido a su poca difusividad, el Ca es muy utilizado para la captura de CO_2 lo cual aumenta la concentración de H_2 y CO en el *syngas* producido. Respecto al Mg, se considera catalíticamente menos activo que el Ca debido a que su temperatura de descomposición es menor, lo cual reduce su actividad catalítica durante la gasificación.

En cuanto a los catalizadores provenientes de los metales de transición, se resaltan el níquel y el hierro, en la industria juegan un papel importante en la limpieza del gas producido, el Ni se desempeña mejor cuando se usa aguas abajo del gasificador, aumentando el contenido de hidrógeno y monóxido de carbono del *syngas*, con la eliminación o reducción del contenido de hidrocarburos y metano. El hierro se puede obtener a bajo costo como un catalizador de desecho de una serie de procesos mecánicos, así que el bajo costo compensa su menor actividad catalítica, el Fe convierte el H_2S en compuestos no tóxicos, sin embargo, convierte el nitrógeno en HCN y NO_2 tóxicos. Con base en el análisis anterior, la selección de un catalizador para la gasificación de biomasa implica tener varios aspectos en cuenta como: relación costo/beneficio, temperaturas de operación, calidad del gas de síntesis, disponibilidad y vida útil. Por lo tanto, no se puede inferir que un catalizador es mejor que otro, su viabilidad depende de los factores referidos o las necesidades de cada proceso o industria.

REFERENCIAS

- [1] E. Dlugokencky and P. Tans, "Trends in Atmospheric Carbon Dioxide," NOAA/ESRL, 2019. [En línea]. Disponible: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/ [Accedido: May. 20, 2019].
- [2] A. Acosta, "Enhorabuena," *Biocombustibles Hoy*, boletín 172, 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.fedebiocombustibles.com/v3/nota-web-id-2904.htm#s02> [Accedido: May. 20, 2019].
- [3] S. Hosseini, et al., *Int J Hydrog Energy*, vol. 40, no. 41, pp. 14246-14256, 2015.
- [4] International Energy Agency [IEA], "Energy technology in support of the G8 plan of action o escenarios & strategies to 2050," 2008. [En línea]. Disponible: <http://www.iea.org/media/etp/etp2008.pdf>. [Accedido: May. 20, 2019].
- [5] H. Balat and E. Kirtay, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 14, pp. 7416-7426, 2010.
- [6] L. García, "Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo," Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2011.
- [7] V. Grigaitienė, et al., *Catal Today*, vol. 167, no. 1, pp. 135-140, 2011.
- [8] J. Montoya, et al., *Pirólisis rápida de biomasa*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [9] J. Ciferno and J. Marano, "Benchmarking biomass gasification technologies for fuels, chemicals and hydrogen production," U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory, Washington, 2002.
- [10] G. Peres, B. Lunelli and R. Filho, *Italian Association of Chemical Engineering*, vol. 32, pp. 589-594, 2013.
- [11] O. Nooruddin, "Simulation and optimization of IGCC technique for power generation and hydrogen production by using lignite Charcoal and cotton stalk," M. S. thesis, University of Technology, Lappeenranta, 2011.
- [12] M. Shahbaz, et al., *Bioresource Technology*, vol. 241, pp. 284-295, 2017.
- [13] T. Wang, et al., *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, no. 5, pp. 508-514, 2005.
- [14] E. Abu, E. Bramer and G. Brem, *Ind Eng Chem Res*, vol. 43, no. 22, pp. 6911-6919, 2004.
- [15] F. Chan and A. Tanksale, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 428-438, 2014.
- [16] S. Sansaniwal et al., *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 363-384, 2017.
- [17] D. Klass, *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. California: Academic Press, 1998.
- [18] M. de Souza-Santos, *Solid fuels combustion and gasification*. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [19] P. Brachi et al., *Fuel*, vol. 128, pp. 88-98, 2014.
- [20] N. Samiran, et al., *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1047-1062, 2016.
- [21] H. Huang and L. Tang, *Energy Convers Manage*, vol. 48, pp. 1331-1337, 2007.
- [22] W. Peng, et al., *Energy Convers. Manag.*, vol. 135, pp. 270-273, 2017.
- [23] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Burlington: Elsevier Science & Technology, 2010.
- [24] L. Wang, *Pyrolysis of biomass*. Berlin: De Gruyter, 2016.
- [25] Y. Nishiyama, P. Langan, and H. Chanzy, *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 124, no. 31, pp. 9074-9082, 2002.
- [26] P. Harmsen, et al., "Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic Biomass," Food & Biobased Research, Wageningen, Netherlands, Report. 396201, 2010.
- [27] H. Yu, Z. Wu and G. Chen, *Renew. Energy*, vol. 121, pp. 559-567, 2018.
- [28] M. Klein and P. Virk, *Energy Fuels*, vol. 22, no. 4, pp. 2175-2182, 2008.
- [29] A. Sluiter, et al., "Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass," National Renewable Energy Laboratory, U. S., Technical Report DE-AC36-08-GO28308, 2011.
- [30] B. Buchanan, W. Guissem, and R. Jones, *Biochemistry & molecular biology of plants*. Rockville, Md.: American Society of Plant Physiologists, 2000.
- [31] F. Chejne, et al., *La gasificación, alternativa de generación de energía y productos con alto valor agregado para la industria*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [32] V. Kishore, Eds., *Renewable energy engineering & technology: a knowledge compendium*. New Delhi: TERI Press, 2008.

- [33] T. Liliedahl and K. Sjöström, *Fuel*, vol. 76, no. 1, pp. 29-37, 1997.
- [34] A. Bridgwater, *Fuel*, vol. 74, pp. 631-653, 1995.
- [35] D. Flórez, "Obtención de gas de síntesis a partir de la gasificación de cuesco de palma de aceite peletizado," Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2016.
- [36] S. Rincón, A. Gómez y W. Klose, *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial*. Kassel Univ. Press, 2011.
- [37] A. Klein, *Gasification: An alternative process for energy recovery and disposal of Municipal Solid Wastes*. New York: Columbia University, 2002.
- [38] C. Higman and M. Van der Burgt, *Gasification*, 2nd ed., Burlington: Gulf Professional Publishing, 2008.
- [39] G. Marrugo, "Efecto de los cambios estructurales de diferentes biomásas pirolizadas sobre las características del gas de síntesis, obtenido a partir de la gasificación de biochar," Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [40] P. Walker, F. Rusinko and L. Austin, *Advances in catalysis*, vol. II, pp. 133-221, 1959.
- [41] M. Barrio, et al., *Steam gasification of wood char and the effect of hydrogen inhibition on the chemical kinetics*. Wiley, 2000.
- [42] L. Emami et al., *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 16, pp. 5584-5596, 2012.
- [43] J. Rivas and A. Carty, "The effect of biomass, operating conditions, and gasifier design on the performance of an updraft biomass gasifier," Thesis, Kansas State University, 2012.
- [44] Y. Fang, et al., *Fuel Process. Technol.*, vol. 69, no. 1, pp. 29-44, 2001.
- [45] R. Knight, *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, no. 1, pp. 67-77, 2000.
- [46] S. Valin, et al., *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, no. 10, pp. 1222-1228, 2010.
- [47] H. Kitzler, C. Pfeifer and H. Hofbauer, *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 5, pp. 908-914, 2011.
- [48] A. Kalinci, A. Hepbasli and I. Dincer, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 21, pp. 8799-8817, 2009.
- [49] M. Mahishi and D. Goswami, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 32, no. 16, pp. 3831-3840, 2007.
- [50] J. Kawabata, et al., *Chem. Eng. Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 335-345, 1981.
- [51] R. Saxena, et al., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 1909-1927, 2008.
- [52] A. Ocampo, et al., *Fuel*, vol. 82, no. 2, pp. 161-164, 2003.
- [53] K. Devi, J. Ptasiński and F. Janssen, *Biomass Bioenergy*, vol. 24, no. 2, pp. 125-140, 2003.
- [54] J. Mendoza, "Estudio y caracterización teórico-experimental del proceso de gasificación de biomasa residual con adición de vapor," Tesis Doctoral, Universidad del Norte, Barranquilla, 2015.
- [55] J. Martínez, et al., *Renewable Energy*, vol. 38, pp. 1-9, 2012.
- [56] M. Lim and Z. Alimuddin, *Renewable Energy*, vol. 33, no. 10, pp. 2339-2343, 2008.
- [57] B. Cujia, *Interciencia*, vol. 35, pp. 1-7, 2010.
- [58] G. Emig, *Chemie in unserer Zeit*, vol. 21, no. 4, p. 128, 1987.
- [59] J. Hagen, *Industrial Catalysis*. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
- [60] J. Godfrey and R. Searles, *Chemie-Technik*, vol. 10, no. 12, p. 1271, 1981.
- [61] R. Schwankner, "Konzepte der heterogenen katalyse," *Chemie*, vol. 38, pp. 1-7, 1989.
- [62] J. Baltes, B. Cornils and C. Frohning, *Chem. Ing. Tech.*, vol. 4, no. 12, p. 522, 1975.
- [63] W. Mroß, *Umschau*, vol. 7, p. 423, 1985.
- [64] L. Carballo, *Introducción a la catálisis heterogénea*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [65] H. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 4th Ed., New Jersey: Prentice Hall, 2008.
- [66] P. Liu, *Introduction to porous materials*. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [67] J. Skoog, Holler, and C. Stanley, *Principios de análisis instrumental*, México: Cengage Learning Editores, 2008.
- [68] Y. Leng, *Materials Characterization: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods*. Hong Kong: Wiley, 2008.
- [69] M. Mastuli, et al., *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 16, pp. 11215-11228, 2017.
- [70] M. Hervy et al., *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 572, pp. 97-106, 2019.
- [71] B. Sutton, Kelleher and J. Ross, *Fuel Processing Technology*, vol. 73, pp. 155-173, 2001.
- [72] R. Arnold and J. Hill, *Sustain. Energy Fuels*, vol. 3, no. 3, pp. 656-672, 2019.
- [73] Y. Urabe, T. Ishikura and K. Kaneko, *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 319, pp. 381-383, 2008.
- [74] S. Wu, et al., *Energy Sources, Part A*, vol. 36, no. 2, pp. 184-190, 2014.
- [75] J. Kopyscinski, et al., *Fuel*, vol. 117(part B), pp. 1181-1189, 2014.
- [76] S. Chen and R. Yang, *Journal of Catalysis*, vol. 141, pp. 102-113, 1993.
- [77] L. Jiang, et al., *Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 124, pp. 384-392, 2017.
- [78] X. Lv, et al., *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, pp. 21913-21925, 2016.
- [79] T. Adschiri and T. Furusawa, *Fuel*, vol. 65, pp. 927-931, 1986.
- [80] L. Lobo, *Appl. Catal., B*, vol. 148-149, pp. 136-143, 2014.
- [81] J. Zhong, et al., *Steel Res. Int.*, vol. 88, p. 1600152, 2017.
- [82] R. Li, Q. Chen and H. Zhang, *Energy Fuels*, vol. 31, pp. 5902-5912, 2017.
- [83] Y. Xiang, et al., *Pet. Sci. Technol.*, vol. 34, pp. 1068-1074, 2016.
- [84] S. Chun and J. Whitacre, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 251, pp. 34-41, 2017.
- [85] A. Funke, et al., *Bioresour. Technol.*, vol. 200, pp. 905-913, 2016.
- [86] V. Narayan, et al., *Energy Fuels*, vol. 30, pp. 1050-1061, 2016.
- [87] T. Hanaoka and Y. Okumura, *J. Jpn. Inst. Energy*, vol. 96, pp. 73-85, 2017.
- [88] H. Zhao, et al., *J. Fuel Chem. Technol.*, vol. 46, pp. 27-33, 2018.
- [89] V. Satyam et al., *Bioresour. Technol.*, vol. 209, pp. 157-165, 2016.
- [90] S. Chen and R. Yang, *Energy & Fuels*, vol. 11, no. 421-427, 1997.
- [91] J. Delgado, M. Aznar, and J. Corella, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 36 pp. 15-35, 1997.
- [92] X. Liu, et al., *Fuel*, vol. 188, pp. 474-482, 2017.
- [93] R. Lang and R. Neavel, *Fuel*, vol. 61, pp. 620-626, 1982.
- [94] L. Radovic, P. Walker and R. Jenkins, *Fuel*, vol. 62, pp. 849-856, 1983.
- [95] P. Parthasarathy, et al., *Energy Fuels*, vol. 31, pp. 13692-13704, 2017.
- [96] L. Wei, et al., *Energy Fuels*, vol. 22, pp. 1997-2004, 2017.
- [97] F. Benedikt, et al., *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 34, pp. 2548-2558, 2017.

- [98] J. González, "Efecto del calcio en los mecanismos de la reacción de gasificación de materiales carbonosos con CO₂," Tesis de Maestría, Medellín: Universidad de Antioquia, 2012.
- [99] B. Tian, et al., *Energy Fuels*, vol. 31, pp. 10665–10673, 2017.
- [100] T. Detchusananard, *Chem. Eng. Trans.*, vol. 57, pp. 103–108, 2017.
- [101] Y. Zhang, et al., *J. Catal.*, vol. 237, pp. 405–415, 2006.
- [102] A. Abad, et al., *Chem. Eng. J.*, vol. 310, pp. 226–239, 2017.
- [103] S. Goel, et al., *Symp. (Int.) Combust.*, vol. 25, pp. 1051–1059, 1994.
- [104] M. Kuba, et al., *Energy Fuels*, vol. 30, pp. 7410–7418, 2016.
- [105] N. Alarcón, et al., *Surf. Interface Anal.*, vol. 31, pp. 1031–1041, 2001.
- [106] Z. Zahara, et al., *Energy Fuels*, vol. 32, no. 4, pp. 4255–4268, 2018.
- [107] A. Mabuda, N. Mamphweli and E. Meyer, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1656–1664, 2016.
- [108] L. Mudge, et al., *J. Solar Energy Eng.*, vol. 107, pp. 1985–1989, 2016.
- [109] S. Tanaka, et al., *Energy Fuels*, vol. 9, pp. 45–52, 1995.
- [110] S. Liew and J. Hill, *Appl. Catal., A*, vol. 504, pp. 420–428, 2015.
- [111] H. Gulab, et al., *Int. J. Energy Res.*, vol. 40, pp. 940–951, 2016.
- [112] E. Lorenc-Grabowska and P. Rutkowski, *J. Mater. Cycles Waste Manage.*, vol. 20, pp. 1638–1647, 2018.
- [113] X. Guo, et al., *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 120, pp. 144–153, 2016.
- [114] I. Zamboni, C. Courson and A. Kiennemann, *Appl. Catal., B*, vol. 203, pp. 154–165, 2017.
- [115] B. Domazetis, J. James and Liesegang, *Energy & Fuels*, vol. 22, pp. 3994–4005, 2008.
- [116] M. Said, et al., *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 57, pp. 9788–9797, 2018.
- [117] S. Yan, J. Bi and X. Qu, *Appl. Energy*, vol. 206, pp. 401–412, 2017.
- [118] R. Tang, et al., *Energy Fuels*, vol. 31, pp. 5995–6003, 2017.
- [119] E. Sala, H. Kamazawa and M. Kuds, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 31, p. 612, 1992.
- [120] Y. Nishiyama, *Fuel Process. Technol.*, vol. 29, pp. 31–42, 1991.
- [121] V. Claude, et al., *Energy Fuels*, vol. 30, pp. 8791–8814, 2016.
- [122] W. DeGroot and F. Shazadeh, *Fuel*, vol. 63, pp. 210–216, 1984.
- [123] R. Moghadam, et al., *Energy*, vol. 75, pp. 40–44, 2014.
- [124] S. Sivasangar, *RSC Adv*, vol. 5, pp. 36798–36808, 2015.
- [125] K. Ismail, et al., *Int J Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 3639–3644, 2012.
- [126] L. Cheng, R. Zhang and J. Bi, *J Fuel Chem Technol*, vol. 35, pp. 257–261, 2007.
- [127] K. Koo, et al., *Appl Catal A Gen*, vol. 340, pp. 183–190, 2008.
- [128] Q. Waheed, C. Wu, and P. Williams, *Journal of the Energy Institute*, vol. 89, no. 2, pp. 222–230, 2016.
- [129] S. Maiti, et al., *Energy Fuel*, vol. 24, no. 1, pp. 108–116, 2009.
- [130] K. Otto and M. Shelef, *Carbon*, vol. 15, no. 5, pp. 317–325, 1977.
- [131] C. Altafini, P. Wander and R. Barreto, *Energy Convers Manage*, vol. 44, pp. 2763–2777, 2003.
- [132] B. Babu and P. Sheth, *Energy Convers Manage*, vol. 47, pp. 2602–2611, 2006.
- [133] S. Anis, Z. Zainal and M. Bakar, *Bioresour Technol*, vol. 136, pp. 117–125, 2013.
- [134] A. Dufour, et al., *Int J Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. 1726–1734, 2009.
- [135] Q. Sun, et al., *Fuel*, vol. 90, pp. 1041–1048, 2011.
- [136] M. Mohamad, et al., *Waset.Org*, vol. 5, no. 12, pp. 232–237, 2011.
- [137] S. Hassan, et al., *Appl. Catal. A.*, vol. 220, pp. 59–68, 2001.
- [138] A. R. Ramli, et al., *Malaysian J. Analytical Sci.*, vol. 11, pp. 166–172, 2007.
- [139] Z. Lv, et al., *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 1132–1139, 2007.
- [140] J. Li, et al., *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 22, pp. 9108–9115, 2009.
- [141] R. Baker, J. Chludzinski and R. Sherwood, *Carbon*, vol. 23, pp. 245–254, 1985.
- [142] Global Syngas Technologies Council (GSTC), "The Gasification Industry," [En línea]. Disponible: <https://www.globalsyngas.org/resources/the-gasification-industry/> [Accedido: May. 20, 2019].

Efectos de la radiación ultravioleta en la guadua

Olga L. Vanegas A.¹

Flor N. Díaz P.²

Luis Francisco P.³

Universidad Católica de Colombia – Colombia

Uno de los efectos de la radiación ultravioleta (UV) en las plantas es que interfiere en los procesos químicos (ADN), biológicos, anatómicos y morfológicos. Las plantas más expuestas son las que se encuentran en superficies altas, debido a que la degradación de la capa de ozono, responsable de absorber las diferentes radiaciones que penetran a la tierra, está siendo afectada por el hombre. Se ha estudiado el efecto de las variaciones en el porcentaje de humedad de la guadua y los efectos en sus propiedades de resistencia mecánica, además, que otros factores biológicos pueden degradar su estructura interna. Pero se ha investigado poco acerca de los efectos de la radiación UV-B en ella. El objetivo de esta investigación es presentar un análisis sobre los efectos de la radiación en las plantas, especialmente en la guadua. Para llevar a cabo el estudio se realizó un análisis de las diferentes investigaciones publicadas sobre el tema; inicialmente se estudió la composición de la radiación ultravioleta y el proceso de ingreso y absorción por la atmosfera terrestre, seguidamente el efecto de la radiación UV-B en las plantas, concentrado sobre la guadua misma y analizando su composición y estructura, para posteriormente investigar sobre el efecto de la UV-B. Se encontró que la exposición de la guadua a la radiación más nociva, la que alcanza a traspasar la atmosfera, produce pérdida del porcentaje de masa foliar y descomposición de la hojarasca y, al igual que las demás plantas, se afecta su proceso de fotosíntesis y de crecimiento a través de la inhibición de la hormona AIA, la cual es susceptible de degradación por UV-B.

1. INTRODUCCIÓN

El planeta siempre se ha visto abocado a cambios, unos provocados por el hombre y otros por la naturaleza, que han afectado la forma de vida en el planeta y como nos relacionamos entre nosotros y el medio que nos rodea. En consideración a lo anterior, el presente trabajo de investigación pretende analizar como la radiación solar ultravioleta, entendida esta como conjunto de radiaciones electromagnética, ha influido en los seres vivos, especialmente las plantas.

Gracias a la energía que proviene del espacio ha sido posible la vida como la conocemos y ha influido de manera significativa en su desarrollo, a veces de forma favorable y otros no tanto. La luz que reciben plantas hace posible el proceso de la fotosíntesis, pero si la cantidad de esa luz es variable, las plantas deben competir para obtener la que necesitan con exactitud, pues aquellas que reciben menos no tienen el mismo desarrollo, por lo que algunas han evolucionado, en del proceso de selección natural, con hojas más grandes para captar mayor cantidad de luz [1].

Un efecto benéfico de la luz en las plantas es que toman el dióxido de carbono del aire, más el agua que absorben, como ingredientes principales para que un catalizador, la luz proveniente del sol, haga posible el proceso de la fotosíntesis. El cual, básicamente, consiste en producir azúcar o alimento y oxígeno con O₂ como material de desecho. Este proceso ha beneficiado al hombre, ya que no solo puede obtener el alimento producido, sino también usar algunas plantas para fines distintos a la nutrición, tales como la fabricación de medicamentos y bebidas, de mobiliario para el hogar como puertas, muebles, ventanas y techos, puentes colgantes, cabañas y otras estructuras.

En la presente investigación se estudió el efecto de la radiación ultravioleta UV-B en las plantas, en especial sobre la guadua, debido a que el bambú tiene un sin número de aplicaciones en la industria de la construcción y, al estar expuesto a factores del medio ambiente como la radiación, podrían sufrir daños en su estructura interna y externa, lo que podría disminuir sus propiedades de resistencia mecánica. Debido a la importancia de la guadua en muchos países, es importante estudiar los efectos de la radiación UV-B sobre sus propiedades, porque si se pueden determinar los efectos negativos se podrían iniciar procesos de mitigación antes de que se afecte este recurso natural.

Para llevar a cabo el estudio se revisó la literatura científica relacionada y se analizaron los ensayos realizados por diferentes investigadores del tema, sobre los efectos de la radiación más frecuentes, ya sean morfológicos, químicos (ADN), físicos, de crecimiento y otros. Finalmente, se establecieron los cambios que podrían afectar la resistencia mecánica de la guadua como material de obra. Obtener y caracterizar el tipo de daño generado podría servir para que futuras investigaciones se centren en estudiar las alternativas de inmunización y así mantener la guadua como un material que, además de ser sustentable, tendría mucha más viabilidad técnica en su empleo en obras de construcción.

2. MÉTODO

El estudio sobre los efectos de la radiación ultravioleta en las plantas y en especial la guadua, es un estudio de carácter teórico en el cual, a partir de información secundaria (revistas, artículos, entre otros) se recopilarán las diversas

¹ olvanegas@ucatolica.edu.co

² fndiaz@ucatolica.edu.co

³ lfpedraza@ucatolica.edu.co

investigaciones asociadas al tema de estudio. Es un proyecto institucional de la Universidad Católica de Colombia, perteneciente a línea de investigación Gestión integral y dinámica de las organizaciones empresariales, materiales & materiales para estructuras.

Las fuentes de información con las que se ha estructurado el presente trabajo de investigación corresponden mayormente a trabajos de grados y artículos científicos publicados en revistas, la mayoría propias de las bases de datos de la biblioteca de la Universidad Católica de Colombia, entre las que se encuentran:

- ScienceDirect. Base de datos científica con más de 250,000 artículos en acceso abierto. Artículos que son revisados por pares.
- Tesis de grado. Trabajos de investigación relacionados con la radiación ultravioleta en las plantas, resistencia mecánica de la guadua, entre otras.
- ResearchGate. Es una red social en Internet y una herramienta de colaboración dirigida a personas que hacen ciencia de cualquier disciplina.
- Proquest. Compañía editorial con sede en Ann Arbor, Michigan, que publica en formatos electrónicos y microfilm y suministra servicios de información para universidades, escuelas, empresas, entre otros.

Para llevar a cabo el estudio se realizó un análisis de las diferentes investigaciones realizadas en el tema de estudio, inicialmente acerca de la composición de la radiación ultravioleta, como es el proceso de ingreso y absorción por la atmosfera terrestre, seguidamente se estudió el efecto de la radiación UV-B en las plantas, se realizó una investigación de la guadua misma analizando su composición y estructura, y posteriormente sobre el efecto de la UV-B.

3. RESULTADOS

3.1 Efectos de la radiación en la guadua

La luz solar es la fuente principal de energía para la biosfera y gracias a ella fue posible la vida en la tierra. De acuerdo con Rivas [2], la radiación proveniente del sol abarca un área amplia del espectro electromagnético y dentro de ella, aproximadamente el 40%, es la radiación luminosa. Para que la radiación UV-B sea interceptada y produzca alteraciones en la fisiología de las plantas debe penetrar en la hoja y ser absorbida por cromóforos o moléculas susceptibles al efecto dañino de esta radiación. Por lo tanto, los cambios morfológicos y anatómicos inducidos por la radiación UV-B pueden llegar a ser determinantes en las respuestas de las especies vegetales sometidas a un aumento de este tipo de radiación. Así, frente a un aumento de la radiación UV-B, muchos de los cambios observados, tanto en plantas monocotiledóneas como dicotiledóneas, son principalmente atribuidos a la orientación de las hojas que tiene cada uno de estos grupos de plantas, lo que finalmente influirá en la capacidad de interceptar este tipo de radiación.

Las especies monocotiledóneas que presentan hojas delgadas con orientación vertical interceptan menos radiación UV-B que las dicotiledóneas, debido a que éstas tienen hojas anchas y de orientación horizontal, por lo tanto, son más susceptibles al daño. Por tal motivo, las plantas monocotiledóneas parecen ser generalmente más tolerantes a niveles elevados de radiación UV-B. Por otra parte, las plantas aclimatadas a condiciones de alta radiación UV-B, por ejemplo, en alta montaña, se caracterizan principalmente por presentar tallos y ramas cortas, resultando plantas de morfología más bien compacta y de tamaño pequeño. La disminución de la altura de las plantas expuestas a altas intensidades de radiación UV-B ha sido relacionada directamente con la inducción de internudos más cortos en distintas especies. Por tal motivo se ha sugerido que el mecanismo por el cual la radiación UV-B reduce la longitud del tallo sería la oxidación de fitohormonas inductoras del tamaño de las células, como el ácido indolacético (IAA), el cual es susceptible de ser degradado por la radiación UV-B.

Blumthaler y Ambach [3] manifiestan que ha habido un ligero aumento, alrededor del 1%, anual en el flujo de la radiación solar ultravioleta B desde 1981, y sugieren que este aumento puede estar asociado con un agotamiento del ozono a largo plazo. Un aumento de la radiación UV-B estaría estrechamente relacionada con la capacidad de la atmosfera terrestre de absorber dicha radiación, por lo que, si se debilita la capa de ozono, mayor será la radiación que incida sobre los seres vivos. Como se ha indicado la radiación, a medida que ingresa a la tierra y se acerca a la corteza terrestre, pierde energía y se absorbe gran parte de la peligrosa, por tanto, es de esperarse que en lugares de alta montaña y ciudades a gran altitud presenten mayores riesgos, al estar más expuestos a dicha radiación.

Si bien la radiación UV-B comprende una pequeña región del espectro electromagnético, su acción sobre plantas y animales es considerable. Esto principalmente es debido a que biomoléculas como proteínas y ácidos nucleicos, por presentar electrones, la absorben fuertemente. Son numerosos los efectos atribuibles a esta radiación, la cual ha estado siempre presente en el ambiente, más aún a medida que la capa de ozono se deteriora. A continuación, se describen los efectos más comunes sobre la guadua.

3.1.1 Morfológicos y anatómicos

A lo largo de la evolución la radiación UV-B ha inducido en las plantas diversos cambios anatómicos, que han modificado su intercepción y penetración al interior de las células. Por ejemplo, el aumento de ceras y el cambio en la composición en la superficie foliar, observado en especies expuestas a UV-B, favorece la reflexión de la luz desde la superficie foliar y contribuye a reducir su penetración en las hojas. En las coníferas esta penetración, medida por medio de micro sensores de fibra óptica, resulta ser prácticamente nula, 3% - 12% en plantas leñosas y hierbas y 18% - 41% en plantas herbáceas dicotiledóneas. El aumento del grosor de las hojas es otro de los cambios anatómicos observado en plantas expuestas a radiación UV-B. Esto se debe al aumento del grosor de la pared celular a consecuencia de la inducción de síntesis de lignina y otros polifenoles.

Un porcentaje de la radiación UV-B que penetra a través de la hoja es absorbido por cromóforos asociados al aparato fotosintético, así, las respuestas fotomorfogénicas tienen un impacto directo sobre la mantención de su estructura y funcionamiento. Fagerberg [4] señala, por ejemplo, que en diferentes cultivos de arroz los niveles de radiación UV-B de 15-16 kJ·m⁻² provocan destrucción de membranas en cloroplastos y desorganización de granos, mientras que en el maíz una intensidad de 9 kJ·m⁻² provoca colapso de la epidermis adaxial en la zona distal de las hojas. Según Teveni [5] una de las características que presentan las plantas ubicadas a gran altura es tallo y ramas cortas, resultando plantas de morfología más bien compacta y de tamaño pequeño.

Otras características de las plantas a gran altura es la disminución de la masa de brotes, cuando la reducción de ozono es severa, aumento de las cantidades de algunos compuestos fenólicos en tejidos vegetales y, quizás, reducciones en el área de follaje. En algunos casos las respuestas de crecimiento pueden reducirse, aumentando las concentraciones de CO₂, por los cambios en la química de los tejidos vegetales generalmente no se revertirán por el aumento de este. Entre otras cosas, los cambios en la química de los tejidos vegetales inducidos por el aumento de UV-B pueden reducir el consumo de tejidos vegetales por insectos y otros herbívoros, aunque ocasionalmente puede aumentar el consumo. El ataque de patógenos sobre las plantas puede aumentar o disminuir como consecuencia de la elevación de UV-B, en combinación con otros cambios climáticos. Esto puede verse afectado tanto por alteraciones en la química de la planta como por daño directo a algunos patógenos. La limitación de agua puede disminuir la sensibilidad de algunas plantas agrícolas a UV-B, pero para la vegetación en otros hábitats esto puede no aplicarse.

3.1.2 Estructura química

Los componentes químicos del bambú son muy complejos porque, como la madera y residuos agrícolas, se compone principalmente de celulosa, hemicelulosas y lignina, a pesar de que su contenido es diferente. Los constituyentes menores son diversos polisacáridos solubles y materiales de proteínas, resinas, taninos, ceras, una pequeña cantidad de cenizas, y así sucesivamente.

De acuerdo con los resultados de los trabajos analizados, el comportamiento químico de la superficie de bambú juega un papel importante para su utilización, debido a que la conforma un polímero complejo consistente principalmente de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S). El contenido de celulosa y hemicelulosas en la superficie de bambú son, obviamente, más bajos que los de la lignina. Las hemicelulosas contenidas en la capa externa de bambú es menor que en la capa interior. Hay una cerosa o una capa de silíceo en la superficie que afecta a la propiedad de conglutinación interfacial entre las partículas de bambú y el adhesivo en el proceso de fabricación de material compuesto.

3.1.3 Color

Durante la degradación, los materiales de bambú sufren cambios químicos complejos que conducen a su decoloración, disminución de la ligereza, rugosidad y agrietamiento de las superficies [6]. Estudios realizados muestran que, cuando el bambú es expuesto a más de 100 horas de radiación ultravioleta, el color cambia. La tonalidad adquirida transcurre de blanco a amarillo-rojo y se profundiza con una exposición prolongada. El cambio de color está estrechamente relacionado con la radiación con longitudes de onda por debajo de 396 nm, lo que causa principalmente fotoamarilleamiento, como se observa en la Figura 1.



Figura 1. Cambio de color en la guadua debido a la radiación [6]

Las tonalidades son el resultado del reflejo de la luz en la planta y de acuerdo con la longitud de onda que incide sobre la misma (Figura 2). En el bambú, por ejemplo, a los 400 nm se observa un color púrpura, a 580 amarillo, y a 700 nm rojo.

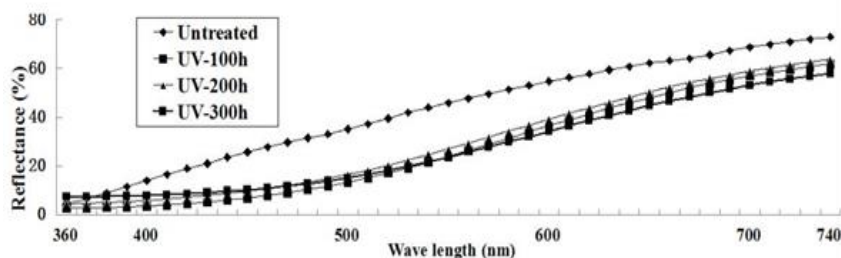


Figura 2. Espectro de la longitud de onda [6]

Se ha propuesto que la Radiación UV-B es la responsable de la reducción del tamaño del tallo de las plantas ubicadas en la alta montaña, debido a la oxidación de fitohormonas inductoras del tamaño de las células, como el ácido indolacético (AIA) (Ver Figura 3), la cual es susceptible de a ser degradada por la radiación UV-B.

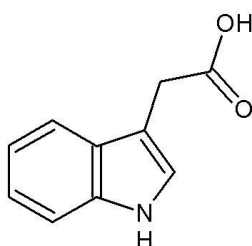


Figura 3. Ácido indolacético (AIA)

Las auxinas son hormonas de crecimiento en las plantas por su capacidad de estimular el crecimiento diferencial en respuesta a estímulos de luz [7]. Las fitohormonas son las que juegan el rol más importante en el desarrollo de las plantas y se han descrito cuatro auxinas naturales sintetizadas por plantas: AIA, ácido indol-3-butírico (IBA), ácido 4-cloroindol-3-acético (4-Cl-AIA) y ácido fenilacético (PAA) [8]. Además, se ha encontrado que el AIA estimula el enraizamiento del bambú. La industria agroquímica ha desarrollado auxinas sintéticas que imitan la estructura del AIA. Las auxinas sintéticas más ampliamente utilizadas como herbicidas son el ácido diclorofenoxiacético (2,4-D) y el ácido naftaleno-1-acético (NAA) [9]. En contraste con AIA, estos herbicidas poseen una larga vida media, debido a su alta estabilidad en plantas superiores y, por lo tanto, mayor efectividad que el AIA.

El AIA es la principal auxina nativa de las plantas superiores [10] y está involucrado en el crecimiento y desarrollo de las plantas, principalmente en una serie de procesos fisiológicos que incluyen el alargamiento y división celular, diferenciación de tejido, fototropismo, gravitropismo y respuestas defensivas [11], destacando un importante rol en la formación de xilema y la raíz. La biosíntesis de AIA no está limitada a las plantas superiores. Organismos como bacterias, hongos y algas son capaces de sintetizar AIA, lo que también puede afectar el crecimiento y el desarrollo de las plantas [12].

El Ácido Indolacético es muy usado en la industria de alimentos, más bien por los productores de alimentos, como aditivo para mejorar la eficiencia en la producción, porque favorece la expansión foliar, lo que a su vez propicia el aprovechamiento de los recursos al estimular el desarrollo de los frutos y, el tallo principal y reducir el crecimiento de ramas laterales. La disminución del área foliar, que se refleja en la presencia de hojas de menor tamaño, se produce a consecuencia del efecto inhibitorio de la radiación UV-B sobre la expansión del epitelio de la cara adaxial, la que normalmente recibe flujos de radiación mayores a la abaxial (Figura 4). Se ha demostrado que la expansión de las células epiteliales es la que regula el crecimiento foliar.

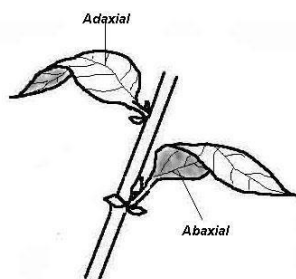


Figura 4. Caras adaxial y abaxial de las hojas

Hay evidencia científica que demuestra que la regula del aumento foliar la realiza la expansión de las células epiteliales, además, que la inhibición de la expansión observada en condiciones de alta radiación UV-B se produce debido a un mayor entrecruzamiento de los enlaces formados entre carbohidratos y ácido ferúlico. Esto finalmente reduce la extensibilidad de la pared celular, lo cual concuerda con lo encontrado en [13], quienes observaron un aumento de la proporción de ácido ferúlico en el epitelio de hojas de cebada como respuesta a la radiación UV-B

3.1.4 Daños al ADN

El ADN es particularmente sensible a radiación UV-B, debido a que los fotones del tipo ultravioleta promueven transiciones en las bases nitrogenadas que constituyen los nucleótidos alterando directamente el establecimiento normal de enlaces químicos [14]. La fototransformación producida en el ADN afecta principalmente las bases de timina adyacentes, que forman estructuras cíclicas denominadas dímeros de pirimidina ciclobutano (CPDs) [15].

Bajo condiciones de radiación UV-B no solo se observan lesiones en el ADN del tipo CPDs, también induce la formación de otros fotoproductos denominados dímeros de pirimidina pirimidona (6-4 PPs) entre bases adyacentes de timina y citosina. La radiación UV-B puede dañar directamente al ADN, tanto en las plantas como en animales, debido a que la absorción de la radiación induce la formación de dímeros de pirimidinas adyacentes, resultando en dos tipos de daño: en mayor medida los dímeros de pirimidinas por formación de anillos de ciclobutano (DPCs) y, en menor medida, los 6-4 fotoproductos (6-4 PP).

4. CONCLUSIONES

El consenso al que ha llegado la comunidad científica que estudia los efectos de la radiación en las plantas es que uno de los efectos negativos de la UV-B está relacionado con la inhibición del crecimiento. Ahora, el crecimiento de las plantas se puede abordar por dos caminos: 1) el que establece que la planta, al absorber UV-B, destruye mediante oxidación de fitohormonas inductoras del tamaño de las células, como el ácido indolacético (AIA); en otras palabras, las células crecen mucho menos que aquellas con una dosis de exposición menor; 2) el bajo crecimiento está asociado con la inhibición a la proliferación de nuevas células o la división celular, puesto que un número menor de células traerá consigo un menor tamaño tanto de las hojas como del tallo principal.

Un aumento de la radiación UV-B en todo el planeta, a causa de la degradación de la capa de ozono o de otros factores inducidos por el hombre, podría significar un grave peligro al crecimiento de las plantas, el incremento de la tasa de descomposición de hojarasca y afectaciones en el proceso de fotosíntesis, con lo que se afectarían significativamente las condiciones de vida en la tierra para todas las especies.

La radiación afecta el ciclo de Calvin e induce la pérdida de actividades enzimáticas en el mismo, con lo que se afecta la fijación o asimilación del CO₂. El proceso es vital en la producción de glucosa, por lo que, al afectar el ciclo también estaría afectando de manera indirecta el crecimiento, dado que las plantas sustraen de ella la energía y su alimento. Una consecuencia potencial sería que, al afectar la fijación de CO₂, este no podría ser utilizado por las plantas y sería devuelto al ambiente, con lo que se podrían incrementar los gases de efecto invernadero. Un pigmento que ayuda a combatir el efecto de la radiación, por poseer capacidades antioxidantes, son los flavonoides, los cuales incrementan su presencia cuando las plantas son expuestas a dosis de radiación UV-B.

La radiación ultravioleta afecta el ADN de las células en los seres vivos y está asociada a distintos tipos de cáncer, incluido el melanoma. En las plantas se ha encontrado que induce la formación de dímeros de pirimidinas adyacentes, resultando en dos tipos de daño: 1) en mayor medida a los dímeros de pirimidinas por formación de anillos de ciclobutano (DPCs) y, 2) en menor medida, los 6-4 fotoproductos (6-4 PP). Ambos tipos de dímeros bloquean la replicación del ADN e interfieren con la síntesis del ARNm durante la transcripción. El daño en el ADN es citotóxico y mutagénico para las células, y si no es removido puede causar la muerte celular.

La exposición del bambú a más de 100 horas de radiación ultravioleta provoca un cambio en el color. La tonalidad adquirida transcurre de blanco a amarillo-rojo, y el color se profundiza con una exposición prolongada.

Trabajo futuro

Dado que en la investigación realizada se presentaron los efectos de la radiación UV-B en las plantas y en la guadua, a futuro podrían realizarse pruebas experimentales bajo diferentes condiciones de temperatura, humedad, esfuerzo, etc., para validarlas.

Se podría de igual forma realizar ensayos que busquen obtener respuestas sobre cómo y en qué medida se afecta el crecimiento de la guadua al estar expuesta a la radiación UV-B, y comprobar si sus auxinas presentan igual, mayor o menor resistencia a la degradación de estas hormonas frente a otras plantas. Hay literatura científica que afirma que los flavonoides de la guadua, dada sus bondades antioxidantes y absorbentes de radiación UV-B, podrían ser utilizados en la industria de la cosmetología e incluso como protector solar.

Otra línea de investigación sería analizar la posible correlación entre la radiación UV-B y el porcentaje de humedad, bajo la tesis que la humedad es una consecuencia de la radiación.

Analizar a través de microscopio electrónico las variaciones que se producen en la guadua una vez esta es sometida o expuesta a la radiación UV-B, con el propósito de observar los cambios en su estructura y establecer el tipo de daño producido.

REFERENCIAS

- [1] C. Lascano, *Establecimiento y renovación de pasturas*. Cali: CIAT, 1991.
- [2] J. Rivas, La luz y aparato fotosintético. En J. Azcón, M. Bieto & T. Cubillo (Eds.), *Fundamentos de fisiología vegetal* (pp. 165-189). Barcelona: McGraw-Hill, 2008.
- [3] M. Blumthaler, and W. Ambach, "Indication of increasing solar Ultraviolet-B radiation flux in alpine regions." *Science*, vol. 248, no. 4952, pp. 206-208, 1990.
- [4] W. Fagerberg, and J. Bornman, "Ultraviolet-B radiation causes shade-type ultrastructural changes in Brassica napus." *Physiol Plant*, vol. 101, no. 4, pp. 833-844, 1997.
- [5] M. Teveni, "UV-B effects on terrestrial plants." *Photochem Photobiol*, vol. 50, no. 4, pp. 479-487, 1989.
- [6] Y. Haixia, et al., "Surface discoloration analysis and lignin degradation fragments identification of UV-Irradiated Moso Bamboo." *BioResources*, vol. 10, no. 1, pp. 1617-1626, 2015.
- [7] Y. Zhao, "Auxin biosynthesis and its role in plant development." *Annual Review of Plant Biology*, vol. 61, no. 61, pp. 49-64, 2010.
- [8] J. Wisniewska, et al., "Localization directs auxin flow in plants." *Science*, vol. 312, no. 5775, pp. 883-883, 2006.
- [9] S. Simon, and J. Petrášek, "Why plants need more than one type of auxin." *Plant Science*, vol. 180, no. 3, pp. 454-460, 2011.
- [10] J. Bonner, and R. Bandurski, "Studies of the Physiology, Pharmacology, and Biochemistry of the Auxins." *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 3, no. 1, pp. 59-86, 1952.
- [11] J. Leveau, and S. Lindow, "Utilization of the Plant Hormone Indole-3-Acetic Acid for Growth by Pseudomonas putida Strain 1290." *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 71, no. 5, pp. 2365-2371, 2005.
- [12] S. Lee, et al., "Indole-3-Acetic Acid Biosynthesis Is Deficient in Gluconacetobacter diazotrophicus Strains with Mutations in Cytochrome C Biogenesis Genes." *Journal of Bacteriology*, vol. 186, no. 16, pp. 5384-5391, 2004.
- [13] L. Liu, et al., "Effects of UV-B on flavonoids, ferulic acid, growth, and photosynthesis in barley primary leaves." *Physiol Plant*, vol. 93, no. 4, pp. 725-733, 1995.
- [14] A. Strid, W. Chow, and J. Anderson, "UV-B damage and protection at the molecular level in plants." *Photosynthesis Res.*, vol. 39, no. 3, pp. 475-489, 1994.
- [15] J. Li, et al., "Similarities and differences between cyclobutane pyrimidine dimer photolyase and (6-4) photolyase." *Journal Biol Chem*. vol. 281, no. 35, pp. 25551-25559, 2006.

Aprovechamiento de condensados de aires acondicionados en climas cálidos para riego automatizado de jardines impulsado por energía solar

José C. Galindo G.¹
Carlos E. Arrieta G.²

Iván Mora U.³

Iván Maestre A.⁴

^{1,3,4} Fundación Universitaria del Área Andina

² Universidad de Medellín
Colombia

El agua de condensados generados por la operación de sistemas de climatización de edificaciones ubicadas en zonas urbanas generalmente son conducidos y descargados en sistemas de drenajes municipales. Reutilizar los condensados para riego de jardines permite disminuir la presión que en la actualidad se ejerce sobre las fuentes hídricas naturales de las que se abastecen la mayoría de los sistemas de acueducto municipales, considerando que una vez potabilizada el agua se utiliza en gran parte para el riego de zonas verdes. Por lo anterior, en este trabajo se realizó un estudio para una edificación de uso académico de 8755 m² ubicado en zona tropical de clima cálido semi árido, elevación media del territorio de 200 msnm, temperatura ambiente promedio 29 °C y humedad relativa promedio de 65 %, con el cual se buscó establecer el potencial de aprovechamiento del agua de condensados generada en la operación de los sistemas de aires acondicionados instalados para climatización de los recintos y proyectar su reutilización para el riego de jardines de las instalaciones. Los resultados indican que la tasa promedio de producción de condensados en condiciones normales de operación de los equipos de climatización es 2086.8 Litros/día, útiles para destinar al riego diario de 346 m² de césped. La caracterización fisicoquímica y de nutrientes esenciales, NPK, de muestras de agua de condensados analizadas muestran la posibilidad de utilizarse para riego. Finalmente, se desarrolla una propuesta que permita automatizar el riego e incorporar el uso de energía fotovoltaica -fuera de red- para su operación, haciendo posible tanto la autonomía como la replicabilidad del sistema para zonas urbanas o rurales que registren condiciones climáticas similares.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas diversos planteamientos a nivel mundial se han encaminado a destacar, enmarcado dentro del concepto de sostenibilidad, la importancia de aprovechar recursos naturales antes de ser dispuestos luego de un primer uso. Es así como se han considerado el aprovechamiento del agua residual, reciclaje de materiales utilizados para la construcción de edificios y la reducción del consumo energético. Dentro de los enunciados, el reuso de aguas residuales para riego es una práctica que ha sido implementada desde la era de bronce por civilizaciones prehistóricas hasta la actualidad, y al día de hoy es el recurso que más avances tecnológicos y de aplicaciones se han proyectado buscando su aprovechamiento. Las principales actividades para las que se proyecta el reuso son riego de jardines y en agricultura, recarga de acuíferos, barreras contra aguas marinas, aplicaciones industriales, operación de aparatos sanitarios en edificaciones y otros usos urbanos [1].

En cuanto al consumo de recursos para la operación de las edificaciones, en este caso el agua potable, en EE.UU. se han establecido incentivos para incrementar el otorgamiento de puntos para obtener certificaciones bajo el estándar LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) a aquellos proyectos de edificaciones que instalen válvulas de descarga de aparatos sanitarios que operen con mayor eficiencia. En el mismo sentido y previendo un ahorro de recursos usado en la operación de edificaciones, expone la posibilidad de aprovechar el agua generada en la operación de los equipos de sistemas de climatización para riego de jardines [2-4]. Incluso en algunas municipalidades se ha restringido el uso de agua potable para riego [2]. Algunas investigaciones adelantadas indican el uso potencial de condensados para operación de sanitarios, adicionando un colorante al agua y etiquetando las tuberías de servicio que permitan distinguirla de la potable usada en lavamanos [5, 6]. También se ha considerado tratar el agua de condensados a tal punto que pueda potabilizarse para consumo humano [7, 8], siendo esta última la apuesta más elevada para el aprovechamiento de condensados.

Para el caso de grandes edificaciones de uso comercial se considera que la tasa de producción de condensados derivados de la operación de equipos de climatización centralizados es suficiente para suplir la demanda para riego de jardines propios y zonas verdes cercanas a estas instalaciones. Es claro que la configuración requerida para recuperar los condensados de sistemas de climatización debe concebirse desde los diseños de redes e instalaciones, para luego incorporarse en la etapa de planeación y subsecuente construcción de proyectos de edificaciones [6], pues con un adecuado tendido de tubería se puede configurar un sistema que permita aplicar automáticamente el riego en las zonas que lo requieran [2, 5]. Por citar un ejemplo, se tiene el caso de la torre de Dubai - Burj Khalifa - que cuenta con un área construida de 465000 m², donde se aprovechan los condensados de aires acondicionados y estiman que logran ahorrar el consumo de alrededor de 37 mil metros cúbicos de agua potable por año [4, 5]. Otros casos de

¹ jgalindo22@areandina.edu.co

² carrieta@udem.edu.co

³ imora3@estudiantes.areandina.edu.co

⁴ imaestre@estudiantes.areandina.edu.co

edificaciones ubicadas en las ciudades de San Antonio, Houston, Atlanta y Wauseon en EE.UU. han sido referidos en estudios donde se recuperan desde 133 hasta 3407 m³/año de condensados derivados de la operación de equipos de climatización [4].

Sumado a lo anterior, se tienen investigaciones que plantean que la demanda de recursos naturales para la operación de las instalaciones en edificaciones a nivel mundial puede estar subestimada, a la vez que establecen la existencia de una estrecha relación entre la energía y el agua que consumen estos [4, 9]. Con esto de presente, se busca establecer si es viable el aprovechamiento de las aguas subproductos de procesos propios del ambiente local, en este caso, la climatización de recintos de un campus educativo ubicado en zona tropical de clima cálido semi árido. En la edificación objeto de estudio el riego de jardines se realiza con agua potable del acueducto municipal. El agua de condensados de sistema de aires acondicionados no tiene ningún aprovechamiento y una fracción es descargada a la red de drenaje municipal, mientras que otra registra vertimientos a vías de circulación que causan empozamientos localizados que pueden propiciar escenarios favorables para reproducción de vectores endémicos transmisores de enfermedades. Una evaluación preliminar arrojó que las zonas verdes son del orden de 1500 m², las cuales requieren alrededor de 130 m³ de agua por mes para su riego y manutención.

El presente estudio evaluó el aprovechamiento para labores de riego de zonas verdes de una fuente no convencional de agua generada, en este caso, como subproducto de la operación de equipos de climatización. Lo anterior se llevó a cabo determinando la tasa de generación de agua derivada de la operación en condiciones normales de uso de los equipos. También se determinaron propiedades del agua que permitieron establecer su uso potencial para irrigación de jardines. Finalmente se propuso un arreglo, a partir del almacenamiento de los condensados, para su aprovechamiento por medio del acoplamiento de un sistema automatizado de riego cuyos dispositivos eléctricos operen con energía fotovoltaica.

2. MÉTODO

El presente estudio fue realizado para una edificación que cuenta con tres niveles y pertenece a un campus universitario que registra un área construida de 8755 m², incluyendo zonas y jardines exteriores. Se ubica en zona tropical (10°28'58.58"N, 73°16'19.10"W) de clima cálido semi árido, elevación media del territorio de 200 msnm, temperatura ambiente promedio 29 °C y humedad relativa promedio de 65 %. Por la localización geográfica del sitio de estudio, los registros de temperatura ambiente se mantienen en un rango que no dista de los establecidos como promedio. Los recintos cerrados ubicados dentro de las instalaciones cuentan con equipos de climatización individuales, en este caso aires acondicionados tipo mini *split*, cuya condición normal de operación es configurada para una temperatura de 22 °C y un tiempo promedio de uso de 12 horas por día.

2.1 Inventario de recintos y equipos de climatización

Para todos los niveles de la edificación se identificaron, cuantificaron y midieron el interior de los recintos que contaban con aires acondicionados mini *split*. Con ayuda de un flexómetro se obtuvieron las dimensiones expresadas en metros. Para cada lugar se registró el tipo de aire acondicionado instalado y se tomaron los datos de capacidad de enfriamiento, expresados en BTU/h, indicados en las etiquetas. También se identificaron las tuberías por donde se evacuaban los condensados de cada equipo. Los datos obtenidos de cada registro levantado fueron tabulados para su posterior procesamiento, análisis e interpretación.

2.2 Aforo de condensados

Se aplicó el método de aforo volumétrico para determinar la tasa de producción de condensados para cada capacidad de enfriamiento. Usando la ecuación (1) se obtuvieron los valores de caudal expresados en litros/segundo.

$$\text{Caudal} \left[\frac{\text{L}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{Volumen del recipiente [L]}}{\text{tiempo de llenado [s]}} \quad (1)$$

Usando una probeta plástica de 1000 mL de capacidad y un cronometro con precisión de 1/100 segundos se tomaron los datos de volumen y tiempo, respectivamente. Los datos fueron recolectados midiendo la tasa de producción en simultaneo de cinco aires de la misma capacidad de enfriamiento, tres veces al día (mañana, mediodía y tarde). Los valores de producción para cada tipo y por cada día fueron obtenidos promediando los números registrados en ese periodo de análisis. Teniendo en cuenta que existen instalados equipos mini *split* de tres capacidades de enfriamiento diferentes, esto es, 18, 24 y 36 KBTU/h, se tomaron 90 registros para cada capacidad.

2.3 Determinación de áreas para riego

Se determinaron las áreas externas del campus y con una herramienta computacional para dibujo asistido por computador (CAD) se graficaron e identificaron la distribución, ubicación y medidas de zonas verdes. Esta operación va encaminada a determinar el volumen de agua para el riego que demandan estas áreas.

2.4 Toma de muestras y ensayos a condensados

De los condensados se tomaron muestras de agua para determinar las características físicas y químicas como temperatura, pH, conductividad y alcalinidad total. Estos ensayos fueron realizados con equipos e insumos del laboratorio de química de la institución educativa. Respecto a valores de nutrientes se determinaron los esenciales requeridos para evaluar el uso del agua en riego. Dentro de esto están Nitrógeno total Kjeldahl, Fosforo total y Potasio. Estos últimos fueron realizados a las muestras llevadas a un laboratorio local especializado ubicado en el área del proyecto.

2.5 Propuesta de una alternativa de aprovechamiento de condensados para riego

Con los resultados obtenidos de aforos y calidad de condensados, se desarrolló una alternativa para aprovechar los condensados producidos, a través de una labor de diseño de un sistema de riego automatizado operado con energía solar.

3. RESULTADOS

3.1 Tasa de producción de condensados

En el campus se identificaron y consideraron 67 recintos con equipos mini *split* instalados. Se cuantificaron según la capacidad de enfriamiento (Tabla 1).

Tabla 1. Aires acondicionados mini *split* instalados

Capacidad Enfriamiento (K BTU/h)	Cantidad (un)
18	18
24	22
36	27

Con los datos de promedio diarios registrados en los aforos, según la capacidad de los equipos, se procedió a tabularlos e integrarlos a un análisis consistente en determinar una regresión con el mayor grado de ajuste y que permita predecir la tasa de generación de condensados de aires acondicionados. Adicionalmente, los datos se organizaron según el periodo en que fueron registrados (mañana, mediodía o tarde) de cada jornada de aforos y fueron analizados aplicando ANOVA de un factor con $\alpha=0.05$. Se evaluó si hubo diferencias apreciables entre las tasas de producción de condensados en la mañana, al mediodía y en la tarde, que pudiera condicionar adoptar valores promedios de los datos registrados en cada jornada.

Los datos mostrados en la Figura 1 corresponden a los promedios diarios para las tres capacidades de enfriamiento de los equipos. También se muestran líneas que exponen una tendencia en las tasas de producción de condensados, que al considerar la desviación estándar para una sola unidad evaluada se obtienen para 18K BTU/h = 1.25 ± 0.012 L/h, 24K BTU/h = 1.31 ± 0.01 L/h y 36K BTU/h = 4.54 ± 0.07 L/h.

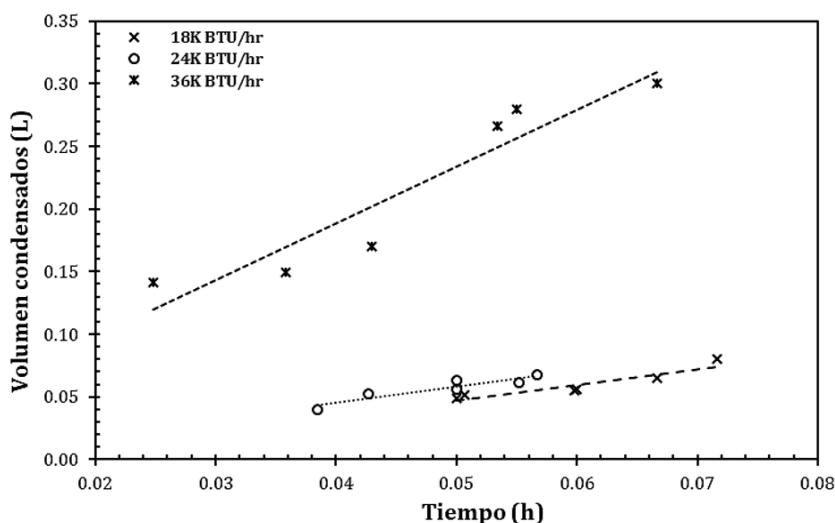


Figura 1. Volumen promedio de producción de condensados por hora para cada capacidad de enfriamiento de equipo, datos experimentales presente estudio

En la Tabla 2 se muestra la tasa experimental de generación de condensados del presente estudio para todos los equipos.

Tabla 2. Tasa proyectada de producción de condensados según capacidad enfriamiento equipo, en L/h

Capacidad Enfriamiento (K BTU/h)	Cantidad (un)	Tasa producción 1 equipo (L/h)	Tasa producción todos los equipos (L/h)
18	18	1.25	22.50
24	22	1.31	28.82
36	27	4.54	122.58

Para estimar la cantidad total de condensados producidos al día, se suman los datos obtenidos en la última columna de la tabla anterior y se computa por el número de horas de trabajo que se han considerado, tal como se propone en la ecuación (2). En este caso considerando 12 horas de operación resultan 2086.80 L/día.

$$\text{Vol. estimado producción condensados } \left[\frac{\text{L}}{\text{día}} \right] = \sum \text{Tasa producción } \left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right] \times \text{Horas de operación [h]} \quad (2)$$

Existe una herramienta en Excel propuesta para el cálculo teórico de condensados de sistemas de acondicionamiento de aire para edificaciones comerciales [4, 5], la cual está disponible para descarga gratuita en www.buildinggreen.com [10]. En esta se deben ingresar las condiciones externas o ambientales (temperatura, en °F, y humedad relativa, en %), internas o al interior del recinto (temperatura, en °F, y humedad relativa, en %), capacidad de enfriamiento (en toneladas inglesas de refrigeración) y aire que una vez ha sido refrigerado puede perderse hacia el exterior (en %). Con miras a validar y comparar los datos experimentales obtenidos en el presente estudio, se evaluó con la aplicación enunciada los parámetros que aplican a las condiciones del sitio, lo cual se muestra en la Figura 2.

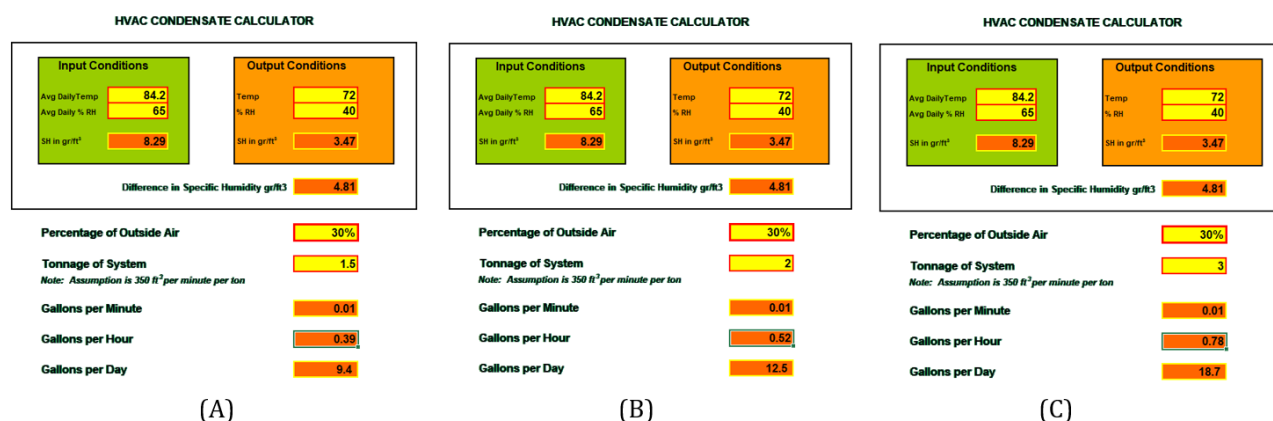


Figura 2. Resultados obtenidos con herramienta para calcular tasa de producción de condensados obtenida en www.buildinggreen.com (A) 18K BTU/h, (B) 24K BTU/h y (C) 36K BTU/h.

Para el equipo de capacidad 18K BTU/h, expresados como 1.5 toneladas inglesas de refrigeración, se estiman 0.39 galones/h equivalentes a 1.48 L/h; para el equipo de capacidad 24K BTU/h, expresados como 2 toneladas inglesas de refrigeración, se estiman 0.52 galones/h equivalentes a 1.97 L/h y para el equipo de capacidad 36K BTU/h, expresados como 3 toneladas inglesas de refrigeración, se proyectan 0.78 galones/h equivalentes a 2.95 L/h.

En [5] y [8] concluyen que, al comparar la predicción de producción de condensados, las teóricas tienden a ser mayores que las experimentales debido a la suposición de condiciones ideales de operación en el planteamiento teórico. La particularidad reportada en dichas investigaciones es similar al registrado en el caso de las tasas de producción de los equipos en operación y las estimadas con la aplicación de Excel en el presente estudio (Tabla 3).

Tabla 3. Reporte de tasas promedio de generación de condensados presente estudio y otros, en L/h

Capacidad Enfriamiento (K BTU/h)	Presente estudio, 2018		2017 [3]	2014 [8]	
	Dato experimental	Aplicativo Excel [10]	Dato experimental	Datos experimental	Dato teórico
12	-	-	1.00	-	-
18	1.25	1.48	-	2.16	2.20
24	1.31	1.97	-	-	-
36	4.54	2.95	-	-	-

Se han divulgado informes de dos estudios similares. Uno fue realizado en Beirut, Líbano, en el que se evaluó durante 53 días la tasa de producción de condensados para equipos split de capacidad 12K BTU/h funcionando en el campus académico de una universidad, estimando un promedio de 1 L/h [3]. Otro llevado a cabo en Dhahran, Arabia Saudita, fue conducido con un equipo de 1.5 toneladas inglesas de refrigeración, equivalentes a 18K BTU/h de capacidad. En este se configuró y operó un arreglo experimental por cuatro meses, además que se planteó un cálculo teórico de producción de condensados, aplicando el principio de conservación de energía a través de los componentes del

sistema de climatización y usando datos climáticos disponibles. Los valores obtenidos, expresados como tasa promedio de producción de condensados, fueron 2.16 L/h y 2.20 L/h, para el experimental y teórico, respectivamente [8]. A continuación, se listan los datos reportados en los estudios citados y los obtenidos con el actual.

A diferencia de los dos estudios reseñados, en el presente se condujo con tres diferentes capacidades de enfriamiento de equipos mini *split*, ubicado en una zona tropical donde no se registran variaciones de temperaturas extremas por no tener las cuatro estaciones, que es una característica común de los otros estudios [3, 8]. Esto debe considerarse en otras zonas del planeta donde el análisis de la climatización de ambientes o recintos cerrados incorpora, también, la operación de equipos para elevar la temperatura del aire, tal como son algunos casos citados en reportes de otros estudios [5].

3.2 Cuantificación de áreas que requieren riego

En el campus se identificaron y midieron las áreas que requieren labores de riego obteniendo 1501.48 m² constituido por jardines, que en su gran mayoría es ocupado por pasto. Estos se localizan en el exterior del primer piso de la edificación, distribuidos en 6 zonas con las siguientes extensiones: Zona 1 de 280.30 m², Zona 2 de 95.94 m², Zona 3 de 198.62 m², Zona 4 de 442.06 m², Zona 5 de 57.36m² y Zona 6 de 427.20 m². El arreglo de esta disposición fue graficado con ayuda de un software CAD, como muestra la Figura 3.

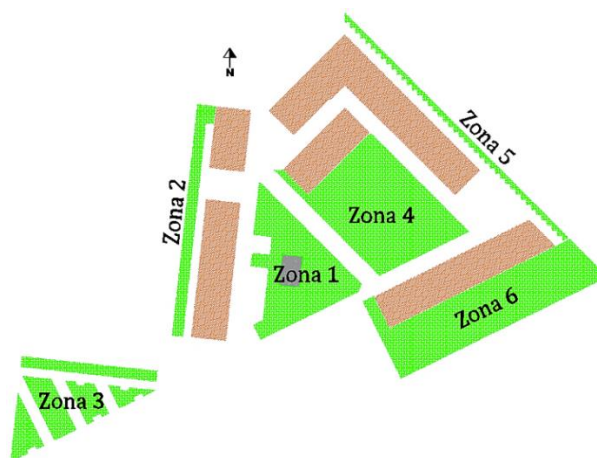


Figura 3. Distribución de zonas verdes para riego, Campus Universitario

La temperatura ambiente promedio y humedad relativa llevan a determinar la evapotranspiración que se presenta en el sitio de estudio, y con lo cual se establecen los mínimos valores de milímetros de columna de agua que deben aplicarse a cada metro cuadrado de zona verde. En la norma [11] se considera un consumo diario para riego de jardines de 2 L/m². Para el presente estudio no se contemplará para cálculos este valor, en razón a que aplica para todo el territorio colombiano, caracterizado por tener diferentes pisos térmicos en poblaciones asentadas en lugares que registran elevaciones medias del territorio entre 0 a 3300 msnm. Además, que se tiene configurado las zonas verdes en su mayoría por césped.

En [3] se menciona que el parámetro evapotranspiración - ETP - se da en función de la cobertura vegetal o de las hojas, tipo de plantas, estructura del suelo y potencial de retención de agua de este, lo cual es concordante con lo indicado en [12] donde se establece como una expresión que agrupa la evaporación del agua del suelo y la transpiración de plantas, además que depende de factores como el clima, temperatura ambiente promedio y humedad relativa. En el presente estudio, para clima cálido, temperatura promedio de 29 °C y humedad relativa de 65 %, al aplicar una corrección por eficiencia en la labor de riego, se adoptó un valor conforme a lo recomendado en [12] y [13] para el riego de pastos de 6 mm/día, equivalentes a 6 L/m² al día.

Al evaluar el área obtenida en cálculos anteriores (1501.48 m²) en la ecuación (3) se obtiene el volumen de agua para riego de todo el campus, esto es 9009 L/día (9.0 m³/día).

$$\text{Volumen de agua para riego por día en el campus} \left[\frac{\text{L}}{\text{día}} \right] = \text{Área} [\text{m}^2] \times \text{ETP} \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2 \times \text{día}} \right] \quad (3)$$

El volumen requerido para aplicar el riego a todas las zonas verdes es mucho mayor que el que se ha proyectado recolectar de los condensados, es decir, 2086.80 litros. Usando la ecuación (4) se determina el área que se puede cubrir con dicha cantidad de condensados. En este caso se obtiene que puede usarse para riego de 347.80 m² al día.

$$\text{Área a suministrar riego con condensados} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{día}} \right] = \frac{\text{Volumen recolectado diario condensados} [\text{L}]}{\text{ETP} \left[\frac{\text{L}}{\text{m}^2 \times \text{día}} \right]} \quad (4)$$

Dado que el área total de zonas verdes son 1501.48 m² y se dispone para riego con condensados recuperados en el presente estudio aplicar en 376.24 m², la razón de cobertura obtenida según la expresión siguiente (ecuación 5) es 25.06 %.

$$\text{Cobertura riego con condensados recuperados [\%]} = \frac{\sum \text{Zonas 1 y 2 [m}^2\text{]}}{\sum \text{Todas las zonas [m}^2\text{]}} \times 100 \% \quad (5)$$

La combinación que resulta de sumar las áreas correspondientes a las zonas 1 y 2, es la más cercana a la cantidad que se puede cubrir para riego con el agua de condensados, 376.24 m², además que por localizarse próxima una de la otra. Para el área de las zona1 y 2, además del valor de ETP usado en la ecuación (3), se obtiene el volumen de agua a aplicar en cada una. En este caso 1682 L/día y 576 L/día, para las zonas 1 y 2, respectivamente.

3.3 Determinación de la calidad de condensados

El estudio [3] reporta que los condensados son parecidos en calidad al agua lluvia y se enfocó a aplicarse directamente para riego de cultivos de lechuga romana y rábano. Otro estudio [8] consideró que el agua de condensados registra una calidad similar al del agua destilada. También se afirma en este y otros estudios que con un proceso de desinfección adecuado puede considerarse aptos para el consumo humano [5, 7, 8]. Adicional al pH y la conductividad (μS/cm) listados, parámetros como la turbiedad (NTU), nitratos (mg/L), oxígeno disuelto (mg/L) y cloruros (mg/L) han sido determinados en otros estudios recopilados en [5], donde se comparan con rangos aceptables para usos domésticos y se precisa que predomina su uso para el caso de riego, donde puede utilizarse sin necesidad de aplicar algún tratamiento.

Buscando establecer la viabilidad de aprovechar los condensados, específicamente para labores de riego de jardines y césped, se determinaron a muestras tomadas los parámetros que se listan en la Tabla (4).

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos y nutrientes de muestras de condensados presente estudio

Parámetro	Unidad	Método - Técnica	Valores
Temperatura	°C	-	16.7
pH		-	8.08
Conductividad	$\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$	-	133.78
Alcalinidad total	$\frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}}$	SM 2320 B - Volumétrico	21.5
Nitrógeno total Kjeldahl	$\frac{\text{mg N}}{\text{L}}$	SM 4500-Norg B / SM 4500-NH3 B, C - Volumétrico	2.31
Fosforo total	$\frac{\text{mg P}}{\text{L}}$	SM 4500-P B,E - Fotométrico	<0.05
Potasio	$\frac{\text{mg K}}{\text{L}}$	SM 3030 K / SM 3500-K B - Espectrométrico	<1.00

La calidad del agua recuperada de condensados se proyecta aprovechar para riego de pastos y jardines, por lo tanto, no debe cumplir criterios rigurosos como para potabilizarse. Al respecto, algunos parámetros para uso en labores domésticas se han recopilado en [5], dentro de los cuales se destaca el rango de pH de 6.5 a 8.5, el cual, según se menciona en [8], es el establecido por la OMS (Organización mundial de la salud) para la potabilización. Los valores de pH de condensados usados para riego de cultivos de lechuga, rábano y albahaca reportados en [3] (8.0 a 8.3) son concordantes con el obtenido a las muestras analizadas en el presente estudio y se sitúan dentro del rango enunciado. Igual caso ocurre con la conductividad eléctrica del agua para uso doméstico que se reporta en uno de los estudios tratados en [5], de 0 a 400 μS/cm, rango donde se sitúa el obtenido en la muestra analizada en el presente estudio.

Otros parámetros como turbiedad, cloruros y nitratos han sido reportados en [8], así como en varios de los estudios tratados en [5], donde además se muestran valores de oxígeno disuelto. En cuanto a los nutrientes esenciales (NPK), en la literatura referenciada no se indican valores óptimos para riego de pastos o jardines. En [3] se reporta la aplicación de 20 gramos de fertilizante (NPK 20-20-20) a los cultivos de verduras rociados con condensados con el propósito de ayudar al crecimiento de plántulas luego de la germinación.

No contar en la actualidad con una normativa aplicada directamente al aprovechamiento de condensados para el riego, conduce a que no se cuenten con parámetros de calidad unificados, y en cambio se adoptan rangos o niveles establecidos para otras labores asociadas de mayor especificación, en este caso, potabilizarse para uso doméstico. Con los resultados obtenidos, se puede asegurar que la muestra evaluada en el presente estudio registra nutrientes esenciales, por lo que se constituye la posibilidad de conducir experimentaciones futuras que permitan establecer niveles óptimos de cada nutriente esencial, según el tipo de especie de cobertura vegetal donde se requiera aplicar.

3.4 Propuesta de alternativa para aprovechamiento de condensados para riego

Dada la posibilidad de utilizar los condensados para labores de riego, se propone una alternativa (Figura 4) para la operación de un sistema de aprovechamiento.

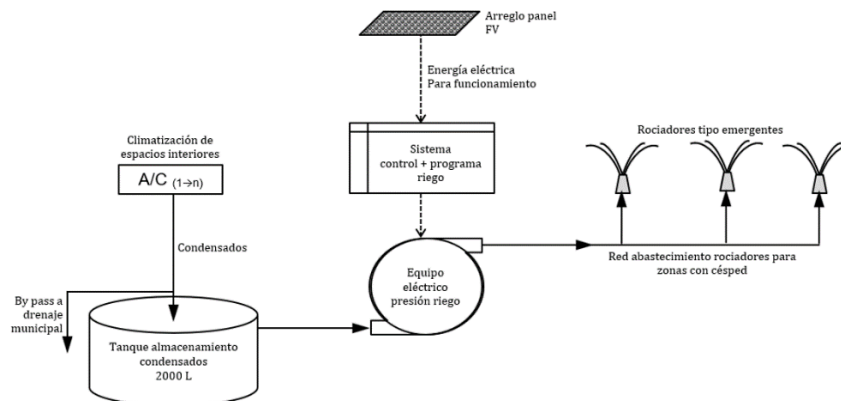


Figura 4. Esquema de alternativa para aprovechamiento condensados para riego zonas verdes del campus universitario

De la figura 4, se observa que los condensados de las unidades de climatización deben conducirse hasta un tanque de almacenamiento enterrado, para facilitar la conducción por gravedad hasta este punto de condensados de equipos ubicado en el primer nivel de la edificación. Al ingreso de dicho receptáculo se propone una conexión tipo *by pass* para conducción de excesos de condensados en caso de llenado, facilitando así la descarga hacia el drenaje municipal existente. El agua recolectada se proyecta usar en el riego del césped de zonas determinadas previamente. A partir de esto, se plantea configurar diversos dispositivos de tal manera que permitan operar el sistema de riego de forma automatizada, incorporando una fuente de energía renovable para los dispositivos eléctricos, en este caso solar. Lo propuesto conlleva a formular el diseño hidráulico para sistema de riego y el diseño del sistema fotovoltaico.

3.5 Diseño hidráulico del sistema de riego

El diseño se planteó considerando algunas de las recomendaciones que específicamente se tienen al respecto en manuales, guías de diseño y catálogos relacionados con sistemas de riego [14-16]. Con estos se desarrolló el siguiente procedimiento.

- **Configuración general del sistema.** El riego se proyecta realizar con un sistema operado con equipo de presión y aspersores automáticos para las zonas verdes 1 y 2.
- **Red de tubería.** El esquema (Figura 5) muestra la propuesta de recorridos de tubería para abastecer los aspersores.

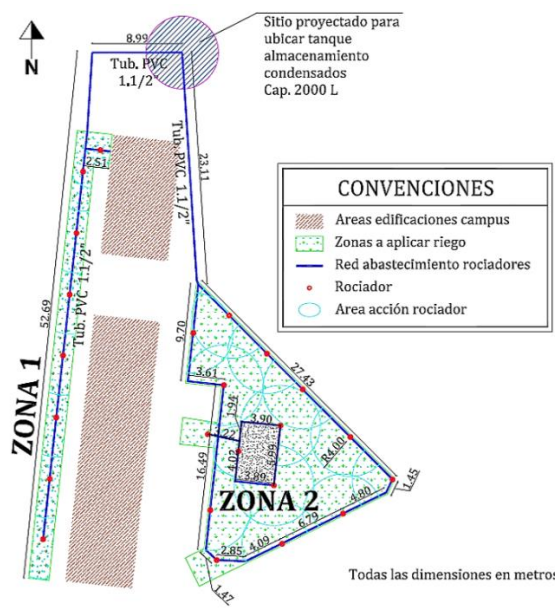


Figura 5. Vista en planta trazado red hidráulica y ubicación aspersores propuestos. Sin escala

- **Especificaciones aspersores.** En este caso correspondió a los aspersores propuestos del tipo emergentes (pop-up), con las especificaciones e la Tabla 5.

Tabla 5. Especificación aspersor propuesto

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro de conexión	pulgada (mm)	1/2 (12.7)
Caudal de operación	galón/min (L/min)	1 (3.79)
Presión de operación	psi (m.c.a)	30 (21.09)
Alcance aspersión	m	8
Cantidad total	unidad	23

- *Tiempo de riego.* Para optimizar la configuración del sistema se estableció el tiempo de aplicación del riego (ecuación (6)) en cada zona. Con los volúmenes de riego (Zona 1: 1682 L/día y Zona 2: 576 L/día) y cantidad de aspersores que se proyectan para cada zona (Zona 1: 15 unidades y Zona 2: 8 unidades), se plantea la siguiente ecuación para determinar el tiempo de riego.

$$\text{Tiempo riego [min]} = \frac{\text{Volumen de agua a aplicar con aspersores en cada zona [L]}}{\text{Caudal operación aspersor } \left[\frac{\text{L}}{\text{min}}\right] \times \text{Cantidad aspersores [un]}} \quad (6)$$

Con los cálculos se obtienen 30 minutos de riego para la zona 1 y 19 minutos de riego para la zona 2. Considerando lo obtenido aquí se evita que la labor de riego se extienda más allá del tiempo necesario, previniendo que se sature el suelo o que la reserva diaria de condensados que se estima almacenar (alrededor de 2000 L) no sea suficiente. Se proyecta poner en funcionamiento el sistema de riego solo en las horas de la noche para evitar al máximo la evaporación del agua, además que las zonas a regar se integran a corredores de movilización peatonal al interior del campus y debe evitarse causar molestias a los usuarios de las instalaciones. Por lo anterior y dado que el pasto se extiende en toda el área a aplicar el riego, se establece el uso de aspersores para aplicar el riego en las zonas determinadas en el presente estudio.

- *Cálculos para determinar el diámetro de la tubería.* Estableciendo que se debe garantizar el caudal y la presión de operación del aspersor más alejado del sitio donde se proyecta instalar el equipo de presión (se considera la misma ubicación del tanque de almacenamiento de condensados), los cálculos deben proyectarse de tal forma que se garantice la operación simultánea de todos los aspersores por lo que deben cuantificarse tanto el caudal total como la velocidad de operación para subsecuentemente determinar el diámetro de la tubería. La ecuación (7) se utilizó para determinar el caudal total por la operación de 23 aspersores, obteniendo 87.17 L/min (1.45 L/s o 0.00145 m³/s).

$$Q_{\text{Diseño}} \left[\frac{\text{L}}{\text{min}}\right] = \text{Caudal operación aspersor} \left[\frac{\text{L}}{\text{min}}\right] \times \text{Cantidad aspersores [un]} \quad (7)$$

De la ecuación (8) de continuidad se obtiene la siguiente expresión para determinar el diámetro de la sección transversal de la tubería.

$$Q = v \times A = v \times \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \rightarrow D [\text{m}] = \sqrt{\frac{4 \times Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]}{\pi \times v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]}} \quad (8)$$

Teniendo en cuenta que, para PVC, la velocidad del flujo de agua recomendada debe ser cercana a 2 m/s, esto para evitar, por bajos valores, sedimentación o, por altos, desgaste prematuro al interior de la tubería. Para un caudal de 0.00145 m³/s y evaluando 1.8 m/s en la ecuación (8) se obtiene un diámetro de 0.032 m, equivalentes a 1.26 pulgadas, que por razones comerciales debe adoptarse 1.5 pulgadas (1.1/2" = 0.0381 m). Para las condiciones planteadas las pérdidas (expresadas en metros) debido a la fricción se determinan mediante la fórmula de Hazen-Williams, ecuación (9).

$$h_f [\text{m}] = 10.674 \times L [\text{m}] \times \left(\frac{Q^{1.852} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]}{C^{1.852} \times D^{4.871} [\text{m}]} \right) \quad (9)$$

Donde L es longitud de la tubería en metros (se evaluará para 1 m), Q es caudal total en m³/s (0.00145 m³/s), C es coeficiente de fricción adimensional (para PVC 150) y D el diámetro de la tubería en metros (0.0381 m). El resultado es 0.045 m/m y su relevancia es que se aplica por cada metro de tubería recorrido.

- *Calculo de equipo de presión.* La ecuación (10) plantea el mecanismo para determinar la potencia del equipo de presión para el sistema de riego.

$$\text{Potencia equipo de presión (HP)} = \frac{\gamma \left[\frac{\text{kg}}{\text{L}}\right] \times H_t [\text{m}] \times Q \left[\frac{\text{L}}{\text{s}}\right]}{76 \times \eta} \quad (10)$$

Donde, γ es el peso específico del agua (1 kg/L), H_t es la altura dinámica total, Q es caudal de diseño, η es la eficiencia del conjunto bomba-motor (expresado en decimal) y 76 es un coeficiente de conversión para el sistema

métrico de unidades. Todos los componentes de la altura dinámica total (H_t) se expresan en unidades de metros y se determina con la ecuación (11).

$$H_t [\text{m}] = h_{ei} [\text{m}] + h_o [\text{m}] + h_f [\text{m}] + h_v [\text{m}] + h_a [\text{m}] \quad (11)$$

Donde h_{ei} es la altura estática (impulsión), h_o es la presión de operación del aspersor, h_f son las pérdidas por fricción en la tubería, h_v son las pérdidas por cabeza de velocidad y h_a son las pérdidas por accesorios.

La altura estática, h_e , representa la distancia vertical neta entre la superficie del agua que se proyecta almacenar en el tanque enterrado y la boquilla de salida del aspersor. Este valor es aproximadamente 1.00 m. La presión de operación del aspersor, h_o , es 21.09 m y las pérdidas por fricción deben considerarse para el recorrido de tubería desde el equipo de presión hasta el aspersor más alejado. En este caso, 23.11 m + 27.43 m + 1.45 m + 4.80 m + 6.79 m = 63.58 m. Al evaluar dicha distancia con el parámetro calculado con la ecuación (9), se obtienen las pérdidas por fricción para el recorrido horizontal de la tubería, 63.58 m x 0.045 m/m = 2.86 m. Para el recorrido vertical el cómputo de h_f es 1.00 m x 0.045 m/m = 0.045 m. Para determinar las pérdidas por cabeza de velocidad, se utilizó la ecuación (12), en donde al evaluar la velocidad de 1.8 m/s se obtienen 0.165 m.

$$h_v [\text{m}] = \frac{v^2 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{2 \times g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]} \quad (12)$$

Las pérdidas por accesorios que se ubican en el recorrido de tubería de impulsión hasta el aspersor más alejado se obtienen a partir de las longitudes equivalentes (Tabla 6) de cada uno de dichos accesorios, a cuya sumatoria se les determinan las pérdidas por fricción calculadas con la ecuación (9).

Tabla 6. Longitudes equivalentes de accesorios en tubería red aspersores

Accesorio	Material	Diámetro (pulgadas)	Cantidad (unidades)	Longitud Equivalente (metros)	Subtotal longitud equivalente (metros)
Registros	Cobre	1.1/2	2	0.21	0.42
Tee	PVC	1.1/2	2	0.55	1.10
Codos radio corto 90°	PVC	1.1/2	5	0.87	4.35
Codos 45°	PVC	1.1/2	3	0.39	1.17
Tee reducida	PVC	1.1/2 a 1/2	6	0.40	2.40
Longitud equivalente accesorios					9.44

Las pérdidas por longitud equivalente de accesorios, h_a , se obtuvieron mediante el cómputo siguiente, 9.44 m x 0.045 m/m = 0.43 m. Con los componentes establecidos, la altura dinámica total para el cálculo del equipo de presión requerido es como sigue $H_t = 1.00 \text{ m} + 21.09 \text{ m} + 2.86 \text{ m} + 0.045 \text{ m} + 0.165 \text{ m} + 0.43 \text{ m} = 25.59 \text{ m}$. Estimando una eficiencia del conjunto bomba-motor del 65 %, el cómputo de la potencia del equipo de presión (ecuación 13) es determinado en la expresión siguiente.

$$\text{Potencia equipo de presión (HP)} = \frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 25.59 \text{ m} \times 1.45 \frac{\text{L}}{\text{s}}}{76 \times 0.65} = 0.751 \text{ HP} \quad (13)$$

La potencia del equipo de presión propuesto debe estar conforme a los disponibles para comercialización, por lo que se proyecta adoptar un equipo de presión de 1.00 HP de potencia, equivalentes a 750 W, centrífuga, de operación eléctrica monofásica a 110 VCA y 3500 rpm.

- *Calculo de altura máxima de succión para equipo de presión.* Para realizar el cómputo de la succión del equipo de presión, se determina el parámetro de la altura máxima de succión (H_{MS}) usando la ecuación (14).

$$H_{MS} = \text{Presión atmosf. a nivel del mar} [\text{m}] - H_{ts} [\text{m}] - H_{elev} [\text{m}] - H_{db} [\text{m}] - H_{vi} [\text{m}] - H_s [\text{m}] \quad (14)$$

La presión a nivel del mar es 10.33 m, H_{ts} corresponde a pérdidas por la temperatura ambiente (0.43 m), H_{elev} son las pérdidas que se dan por localizarse el sitio de estudio a 200 msnm (corresponde para el caso a 0.25 m), H_{db} corresponde a las pérdidas por depresiones barométricas (0.36 m), H_{vi} pérdidas por vacío imperfecto de la bomba (1.80 m a 2.40 m, se adoptarán 2.00 m) y H_s es la altura dinámica de succión que viene dada por la ecuación (15).

$$H_s [\text{m}] = h_{es} [\text{m}] + h_{fs} [\text{m}] + h_{vs} [\text{m}] + h_{as} [\text{m}] \quad (15)$$

Donde h_{es} es la altura estática (succión), h_{fs} son las pérdidas por fricción en la tubería de la succión, h_{vs} son las pérdidas por cabeza de velocidad y h_{as} son las pérdidas por accesorios en la succión.

La altura estática, h_{es} , representa la distancia vertical neta entre la superficie del agua que se proyecta almacenar en el tanque enterrado y el eje de la bomba. Se adiciona la distancia vertical desde la válvula de pie hasta el nivel

de la superficie del agua que se acaba de indicar. Se proyecta instalar la bomba para que el eje se sitúe aproximadamente a 0.60 m por encima del nivel del agua y la parte sumergida de la tubería alcanza 1.50 m. Las pérdidas por fricción deben considerarse para el recorrido de tubería desde la parte inferior de la tubería hasta el ingreso al equipo de presión. En este caso, los tramos vertical y horizontal se proyectan de 2.10 m y 0.80 m, respectivamente. Al evaluar dicha distancia y usando tubería de diámetro 2 pulgadas (0.0508 m) para obtener el parámetro calculado con la ecuación (9), se determinan las pérdidas por fricción para el recorrido de la tubería de succión (vertical y horizontal). El cálculo es $2.90 \text{ m} \times 0.011 \text{ m/m} = 0.032 \text{ m}$.

Para las pérdidas por cabeza de velocidad en la succión (h_{vs}) se utilizó la ecuación (12), en donde al evaluar la velocidad de 2.5 m/s se obtuvieron 0.32 m. Las pérdidas por accesorios que se ubican en el recorrido de tubería de succión hasta la bomba se obtienen a partir de las longitudes equivalentes (Tabla 7) de cada uno de estos y posteriormente se aplica a la sumatoria las pérdidas por fricción calculadas con la ecuación (9).

Tabla 7. Longitudes equivalentes de accesorios en tubería de succión

Accesorio / Dispositivo	Material	Diámetro (pulgadas)	Cantidad (unidades)	Longitud equivalente (metros)	Subtotal longitud equivalente (metros)
Válvula de pie	Cobre	2	1	9.89	9.89
Registro	Cobre	2	1	0.28	0.28
Codo radio corto 90°	PVC	2	1	1.12	1.12
Reducción	Hierro Galvanizado	2 a 1.1/2	1	0.43	0.43
Entrada normal	Hierro Galvanizado	2	1	1.18	1.18
Longitud equivalente accesorios en la succión					12.90

Las pérdidas por longitud equivalente de accesorios en la succión, h_{as} , se obtuvieron mediante el cómputo siguiente, $12.90 \text{ m} \times 0.011 \text{ m/m} = 0.1419 \text{ m}$. Con los datos determinados, la altura dinámica de succión que indica la ecuación (15) es $H_s = 2.10 \text{ m} + 0.032 \text{ m} + 0.32 \text{ m} + 0.1419 \text{ m} = 2.59 \text{ m}$. Evaluando en la ecuación (14) los datos de la succión, se obtiene la siguiente expresión $H_{MS} = 10.33 \text{ m} - 0.43 \text{ m} - 0.25 \text{ m} - 0.36 \text{ m} - 2.0 \text{ m} - 2.59 \text{ m} = 4.70 \text{ m}$.

Ahora se determinará el NPSH (Net Positive Suction Head), equivalente a la altura neta positiva en la succión de la bomba. La ecuación (16) permite realizar el cómputo.

$$\text{NPSH [m]} = (\text{PBA} - \text{PVA}) \text{ [m]} - H_s \text{ [m]} \quad (16)$$

En la ecuación (16), PBA se refiere a la presión barométrica del sitio de estudio y PVA a la tensión de vapor de agua a temperatura ambiente, mientras que H_s corresponde a la altura dinámica de succión cuantificada anteriormente. En [14:17] se referencian valores que agrupan la diferencia de la expresión (PBA - PVA), contenidas en la ecuación anterior. Para una temperatura ambiente cercana a 30 °C y elevación del sitio de 200 msnm, al interpolar los datos referenciados se obtiene, en unidades del sistema métrico, un valor de 9.65 m. Evaluando los datos en la ecuación (16) se obtiene la siguiente expresión $\text{NPSH} = 9.65 \text{ m} - 2.59 \text{ m} = 7.06 \text{ m}$.

Al comparar los valores obtenidos de altura máxima de succión ($H_{MS} = 4.70 \text{ m}$) y la altura neta positiva disponible en la succión ($\text{NPSH} = 7.06 \text{ m}$) se concluye que el equipo puede funcionar bajo las condiciones evaluadas para el sitio de estudio sin cavitación, pues es mayor la cabeza disponible que la máxima requerida en la succión.

3.6 Diseño del sistema fotovoltaico

Los aspectos relevantes por establecer en el análisis del sitio para la instalación son la inclinación respecto a la horizontal, la orientación respecto al norte geográfico o verdadero y la radiación solar en el sitio. Además de lo anterior, se consideran aspectos o, más bien, recomendaciones de tipo local: Deben estar libre de sombras (árboles o vegetación cercana y sombras entre arreglos de paneles), en sitios y posición donde se facilite su autolimpieza, inspección, pruebas y mantenimiento por personal calificado, y fuera del alcance de personal no calificado que pueda manipularlos.

- **Inclinación.** Dada la ubicación dentro de la zona tropical del planeta, para este parámetro se consideran los grados de latitud de las coordenadas geográficas donde se localiza el campus universitario, en este caso $10^{\circ}28'58.58'' \text{ N}$ (10.4829 N). Se propone adoptar para la inclinación del panel fotovoltaico 11° .
- **Orientación.** Por la localización geográfica del campus universitario, al norte de Ecuador, la orientación del arreglo de paneles fotovoltaicos debe hacerse hacia el sur verdadero, es decir, en dirección hacia la línea del ecuador y adoptando la declinación magnética del sitio que registra $-8^{\circ}45'$, por lo que el panel fotovoltaico debe orientarse 8° hacia el Oeste.

La siguiente imagen (Figura 6) esquematiza la inclinación y orientación que se debe dar a los arreglos de paneles para el proyecto. Los parámetros de inclinación y orientación adoptados buscan captar la mayor cantidad de

energía proveniente de los rayos del sol, y que aplican para la ubicación geográfica del sitio de estudio, en este caso zona tropical.

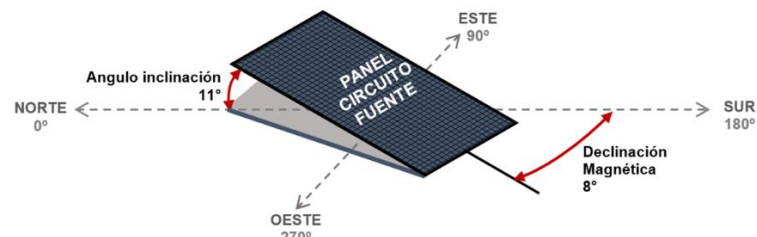


Figura 6. Esquema inclinación y orientación de panel fotovoltaico propuesto para el sitio de estudio

- **Radiación solar y horas de sol por día.** En la figura 7 se muestran los datos para la zona donde se ubica el proyecto. Se adopta, para cálculos posteriores, el menor observado, buscando así garantizar que la producción de energía se realice a partir de la condición crítica. Se adoptó la correspondiente a los datos históricos del mes de octubre, 4.87 kWh/m²/día.

```

-BEGIN HEADER-
NASA/PIONEER SRB/FLASHFlux/MERRA2/ 0.5 x 0.5 Degree Climatology
22-year Additional Solar Parameter Monthly & Annual Climatologies (July 1983 - June 2005), 30-year Meteorological and Solar Monthly & Annual Climatologies (January 1984 - December 2013)
Location: Latitude 10.4829 Longitude -73.2719
Elevation from MERRA-2: Average for 1/2x1/2 degree lat/lon region = 992.37 meters Site = na
Climate zone: na (reference Briggs et al: http://www.energycodes.gov)
Value for missing model data cannot be computed or out of model availability range: -999
Parameter(s):
SI_EF_TILTED_SURFACE SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Solar Irradiance for Equator Facing Tilted Surfaces (Set of Surfaces) (kWh-hr/m^2/day)
SI_EF_OPTIMAL SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Solar Irradiance Optimal (kWh-hr/m^2/day)
SI_EF_OPTIMAL_ANG SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Solar Irradiance Optimal Angle (Degrees)
SI_EF_TILTED_ANG_ORI SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Solar Irradiance Tilted Surface Orientation (N/S Orientation)
Note(s):
Northward facing tilted surfaces are designated negative (-)
PARAMETER JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC ANN
-END HEADER-
SI_EF_TILTED_SURFACE_NEGS 4.49 3.37 2.68 1.80 2.36 2.66 2.62 2.10 2.14 2.80 3.64 4.33 2.92
SI_EF_TILTED_SURFACE_0 5.41 5.24 5.67 5.31 5.07 5.19 5.38 5.19 5.03 4.72 4.77 4.98 5.16
SI_EF_TILTED_SURFACE_10 5.88 5.49 5.76 5.23 5.12 5.28 5.46 5.19 5.04 4.87 5.08 5.43 5.32
SI_EF_TILTED_SURFACE_25 6.30 5.63 5.66 4.91 4.98 5.21 5.36 4.99 4.86 4.90 5.34 5.86 5.33
SI_EF_TILTED_SURFACE_90 4.20 3.10 2.39 1.60 2.14 2.43 2.38 1.86 1.90 2.57 3.41 4.07 2.67
SI_EF_OPTIMAL 6.39 5.63 5.76 5.31 5.12 5.29 5.46 5.21 5.05 4.92 5.36 5.97 5.46
SI_EF_OPTIMAL_ANG 36.00 25.00 12.00 0.00 -9.00 -13.00 -12.00 -5.00 6.00 19.00 31.00 37.00 10.00
SI_EF_TILTED_ANG_ORI S S S S N N N N S S S S S
  
```

Figura 7. Datos radiación solar en el sitio de estudio. Estos datos fueron obtenidos del Proyecto de energía del centro de investigación Langley de la NASA (LaRC), financiado a través del programa de ciencias de la tierra y ciencias aplicadas de NASA [17]

Similar proceso se realiza para obtener los datos de horas de sol por día en el sitio de estudio. Se adopta el mínimo valor presentado, y para considerar los meses de menor tiempo de exposición, se ajusta el dato restando 0.5 horas a este, quedando finalmente para los cálculos 6.5 horas pico de sol por día. Este es el tiempo en el que se tendrá la producción de energía de los paneles y durante el cual debe concebirse que se harán las labores de recarga de los acumuladores (baterías). La configuración que incluye este componente ha sido considerada en algunos estudios [18, 19], debido a los requerimientos derivados de la localización y la configuración del riego que se requiere. Por ejemplo, se ha planteado en el presente estudio realizar dicha labor en horas de la noche. También resulta relevante anotar que no se contempla la interconexión a la red de energía convencional para posibilitar tanto la autonomía como la replicabilidad del sistema, facilitando así su implementación en sitios con características similares que estén situados en zonas urbanas o rurales. En consecuencia, se concibe el sistema como aislado, no interconectado o fuera de red (*off grid*).

- **Cargas de consumo y potencia.** Se establecieron en el desarrollo de cálculos hidráulicos que el equipo de bombeo debe ser de potencia 1.0 HP (750 W), de operación monofásico con una tensión de 110 VCA. Los demás equipos con requerimientos de energía eléctrica para su operación son: el controlador de riego, las electroválvulas y el timer programable para operación de la bomba. En el siguiente arreglo (Tabla 8) se listan los datos respectivos. Para este se estableció que el tiempo de operación de los equipos para la labor de riego será máximo 30 minutos por día (0.50 hora/día). En este procedimiento se proyectará a 35 minutos por día (0.58 hora/día) para tener un margen de seguridad en la operación de + 16.7 %.

Tabla 8. Cuantificación cargas de consumo y potencia

Equipo	Cantidad (un)	Potencia (W)	Uso (hora/día)	Consumo (Wh/día)
ombra centrifuga	1	750	0.58	435
Controlador riego en operación (24 V - 1.4 A)	1	33.6	24	806.4
Electroválvula apagada (24 V - 0.19 A)	2	4.6	23.42	215.46
Electroválvula en operación (24 V - 0.35 A)	2	8.4	0.58	9.74
Timer programable bomba	1	4.5	24	108
Total		801.1		1574.6

- **Cálculo del banco de baterías.** Adoptando un sistema que se proyecta que funcione a 24 V, con una eficiencia del inversor de 90 % y que no posea ninguna carga en corriente directa, se tiene la cantidad de amperios por día en promedio con la ecuación (17), resultando 73 A-h/día.

$$\text{Carga diaria promedio a suplir con batería} \left[\frac{\text{A-h}}{\text{día}} \right] = \frac{\text{Consumo [Wh/día]}}{\text{Eficiencia inversor} \times \text{Voltaje operación sistema [V]}} \quad (17)$$

La autonomía del sistema va encaminada a permitir operarlo de forma automatizada. En dicho sentido, el número de días consecutivos funcionando con batería se obtiene con los datos que muestra la imagen siguiente (Figura 8).

```

-BEGIN HEADER-
NASA/POWER SRB/FLASHFlux/MERRA2/ 0.5 x 0.5 Degree Climatologies
22-year Additional Solar Parameter Monthly & Annual Climatologies (July 1983 - June 2005), 30-year Meteorological and Solar Monthly & Annual Climatologies (January 1984 - December 2013)
Location: Latitude 10.4829 Longitude -73.2719
Elevation from MERRA-2: Average for 1/2x1/2 degree lat/lon region = 992.37 meters Site = na
Climate zone: na (reference Briggs et al: http://www.energycodes.gov)
Value for missing model data cannot be computed or out of model availability range: -999
Parameter(s):
EQVINT_NO_SUN_BLACKDAYS_MONTH SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Equivalent Number Of NO-SUN Or BLACK Days Over A Consecutive Month Period (days)
PARAMETER JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC ANI
-END HEADER-
EQVINT_NO_SUN_BLACKDAYS_MONTH 5.28 1.67 3.18 2.11 3.05 3.40 3.06 5.28 2.89 3.83 2.36 2.17 -999

```

Figura 8. Datos días consecutivos por mes sin sol o ennegrecidos. Estos datos fueron obtenidos del Proyecto de energía del centro de investigación Langley de la NASA (LaRC), financiado a través del programa de ciencias de la tierra y ciencias aplicadas de NASA [17]

Adoptar número de días de autonomía altos provocará que se dimensionen equipos de mayor costo de implementación, en cambio con período comprendidos entre 1 a 3 días resultan ser óptimos. Se propone entonces cubrir por lo menos el menor tiempo, ya que para profundidades de descargas de batería del 50 % por ejemplo, el tiempo de autonomía será el doble. Para el presente estudio se proyectó para el sistema un día y medio (1.5) sin posibilidad de recargarse y funcionando únicamente con baterías de 200 Amperios-hora, con una capacidad de descarga (medida como profundidad de descarga - DoD) de 0.50. Con la ecuación (18) se determina la cantidad de baterías para suplir el consumo. El resultado del cómputo planteado indica que se requiere 1 batería de 200 A-h. Se recomienda utilizar tipo AGM (preferiblemente) o GEL de ciclo profundo (Deep Cycle).

$$\text{Cantidad baterías en paralelo [un]} = \frac{\text{Carga a suplir con batería} \left[\frac{\text{A-h}}{\text{día}} \right] \times \text{Autonomía [día]}}{\text{Profundidad de descarga batería} \times \text{Capacidad batería [A-h]}} \quad (18)$$

Al adoptar un voltaje para funcionamiento del sistema de 24 voltios, se deben utilizar dos (2) baterías de 12 voltios en serie. Con la siguiente ecuación (19) se tiene que el número total de baterías resulta de computar la cantidad requerida para funcionamiento en paralelo (requerimiento de carga de consumo) multiplicado por la cantidad para funcionamiento en serie (requerimiento por voltaje operación sistema).

$$\text{Total baterías} = 1 \times 2 = 2 \text{ baterías de } 200 \text{ A-h, a } 12 \text{ voltios cada una} \quad (19)$$

- **Cálculo de paneles fotovoltaicos.** El procedimiento se realizó estableciendo la corriente pico con la cual trabajarán el arreglo que se proyecta de paneles fotovoltaicos. Para tal fin se tuvieron en cuenta los datos obtenidos con anterioridad. Esto es, carga diaria promedio a suplir con baterías (73 A-h/día), eficiencia de baterías (generalmente se adopta el 80 %) y finalmente el número de horas pico de luz solar, previamente definido en 6.5 horas. Habiendo precisado estos parámetros, la corriente pico del arreglo se obtiene con la siguiente ecuación (20). El cómputo da como resultado 14 amperios.

$$\text{Corriente pico del arreglo [A]} = \frac{\text{Carga diaria a suplir con batería} \left[\frac{\text{A-h}}{\text{día}} \right]}{\text{Eficiencia batería} \times \text{Horas de sol por día} \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right]} \quad (20)$$

Se proyectó utilizar paneles disponibles en el comercio con las especificaciones que se listan en la Tabla 9. La cantidad de paneles se determina con el dato de potencia I_{mp} (6.67 A) en condiciones normales de operación del panel (TNOC). De esta forma se obtuvo el número de módulos requeridos a instalar funcionando en paralelo. La siguiente expresión (ecuación 21) muestra el planteamiento indicado, resultando 2 módulos en paralelo.

$$\text{Módulos en paralelo [un]} = \frac{\text{Corriente pico del arreglo [A]}}{\text{Corriente máxima potencia módulo [A]}} \quad (21)$$

Tabla 9. Especificaciones técnicas panel fotovoltaico policristalino propuesto

Parámetro	Unidad	Valor	
Potencia nominal	W	250	
Voltaje nominal	V	24	
Numero de celdas	unidad	60	
Temperatura nominal de operación de célula, TNOC	Corriente en punto de máxima potencia, I_{mp}	A	6.67
	Corriente en corto circuito, I_{sc}	A	7.09
Temperatura estándar de medida, STC	Voltaje en punto de máxima potencia, V_{mp}	V	27.60
	Voltaje con circuito abierto, V_{oc}	V	35.00
Temperatura estándar de medida, STC	Corriente en punto de máxima potencia, I_{mp}	A	8.26
	Corriente en corto circuito, I_{sc}	A	8.75
Temperatura estándar de medida, STC	Voltaje en punto de máxima potencia, V_{mp}	V	30.30
	Voltaje con circuito abierto, V_{oc}	V	38.00

Ahora con el voltaje en corriente continua (24 V) que se proyecta sea con el que trabaje nuestro arreglo propuesto y el nominal del módulo fotovoltaico (24 V), se obtuvo el número de módulos en serie que se deben instalar. La siguiente expresión (ecuación 22) muestra el planteamiento indicado, resultando 1 módulo en serie. En la Tabla 10 se muestra el resumen de parámetros del arreglo de paneles fotovoltaicos.

$$\text{Módulos en serie [un]} = \frac{\text{Voltaje proyectado del sistema}}{\text{Voltaje nominal del módulo}} \quad (22)$$

Tabla 10. Resumen parámetros arreglo paneles fotovoltaicos, presente estudio

Parámetro	Unidad	Panel Individual	Arreglo (String)
I_{mp}	A	8.26	(8.26 x 2) 16.52
I_{sc}	A	8.75	(8.75 x 2) 17.50
V_{mp}	V	30.30	(30.3 x 1) 30.30
V_{oc}	V	38.00	(38.0 x 1) 38.00

- *Cálculo del inversor.* A la carga total de potencia obtenida con la Tabla (8) se le deben aplicar correcciones por temperatura y por eficiencia. Se adoptan +15 % y +10 %, respectivamente. Con esto se compensa el factor de potencia con los que operan, pues no alcanzan a hacerlo sobre el cien por ciento. Entonces la potencia del inversor para las condiciones inicialmente planteada es como sigue (ecuación (23)), al evaluar los datos se obtiene 1014 W.

$$\text{Pot. Inversor [W]} = \text{Total pot. carga [W]} \times \text{Corrección Temperatura} \times \text{Corrección Eficiencia} \quad (23)$$

Dado que la potencia obtenida para el equipo de bombeo fue 1.0 HP (750 W), con motor monofásico con una tensión de 110 VCA, la corriente de operación se determina como sigue en la ecuación (24). El resultado de las operaciones planteadas es 6.82 A.

$$\text{Corriente operación equipo bombeo [A]} = \frac{\text{Potencia [W]}}{\text{Voltaje [V]}} \quad (24)$$

Al momento de encender el equipo de presión, por ser un motor de fuerza este necesita una potencia mayor por una pequeña fracción de tiempo, del orden de milisegundos, conocido como par de arranque. Se estima entre 3 a 4 veces la corriente de operación. Para este caso se determina con $6.82 \text{ A} \times 4 = 27.28 \text{ A}$, que al operar a 110 VCA, nos da la potencia de arranque del equipo de presión que especifica la potencia pico del inversor. Se obtienen 3000 W. El cálculo del dato se muestra en la siguiente expresión (ecuación 25).

$$\text{Potencia pico inversor [W]} = \text{Corriente pico de arranque [A]} \times \text{Voltaje operación [VCA]} \quad (25)$$

En el comercio se ofrecen inversores que cumplen holgadamente la potencia nominal de operación, así como la potencia pico requerida. Por este último parámetro es que se adopta un inversor con potencia nominal de 1500 W y potencia pico de 3000 W, de onda pura con voltaje de entrada de 24 VCD y de salida de 110 VAC.

La propuesta de disponer corriente alterna para la operación del equipo de bombeo y otros se logra incorporando el inversor. Algunos estudios consideran bombeo con equipos de presión que operan con CD, en atención a la eficiencia de estos dispositivos, por lo que no consideran el inversor dentro de los dispositivos de la configuración planteada en ellos [18-20, 23]. En cambio, en otros se considera el inversor con la configuración del bombeo solar, lo cual posibilita usar equipos que trabajen en CA [19, 21-23].

- *Cálculo del controlador de carga.* Se deben determinar los siguientes parámetros para proceder al cómputo para dimensionar el dispositivo requerido. La corriente de corto circuito del módulo, I_{sc} (8.75 A), el factor de seguridad por valores mayores de radiación solar, en este caso +25 % y el número de paneles en paralelo determinados con la ecuación (21) (2 unidades). El cómputo se realiza con la ecuación (26) y se obtienen 21.88 A, por lo que se recomienda utilizar un controlador de carga de 30 A, que cuente con tecnología MPPT con entrada 24 VCD, Máximo PV del arreglo 100 VCD (V_{oc}).

$$\text{Capacidad controlador carga [A]} = I_{sc} [\text{A}] \times \text{módulos en paralelo [un]} \times \text{FS} \quad (26)$$

Este dispositivo ha sido objeto de varios estudios. Se considera que permite optimizar el funcionamiento de equipos que se configuran para que realice bombeo solar directo durante las horas de sol, donde el circuito fuente - arreglo de paneles fotovoltaicos - puede generar la potencia necesaria para operar los equipos de presión [19, 22, 24]. Para esta configuración se considera almacenar al agua durante el periodo en que se realice el bombeo.

- *Protecciones para sobretensiones y medios de desconexión.* Para el lado de corriente continua se tienen dos (2) ramales o series de circuitos fuente, por lo que se deben proyectar para cada uno de estos un elemento de protección para sobretensiones a la vez que permitan seccionar o desconectarlos. Se puede realizar mediante la implementación de breakers con sus respectivos fusibles de operación para corriente directa (ecuación (27)).

$$\text{Protección requerida [A]} = I_{sc} \text{ serie de paneles [A]} \times \text{Factor seguridad} \times \text{Factor Ambiental} \quad (27)$$

Para la sección entre los circuitos fuente y el barraje en la caja de conexión, usando para cada factor (FS y FA) indicado en la ecuación (27) +25 %, se obtiene con el cómputo 13.7 A. Entonces, se adoptan breakers (x 2 unidades) de CD de 15 Amperios, los cuales se ubicarán en cada uno de los cables con polaridad positivo (+) que lleguen a la caja de conexión de circuitos fuente, y antes del barraje de conexión. Ahora, para la sección entre el barraje de la caja de conexión y el controlador de carga y entre este y el inversor, el cómputo es similar al planteado en la ecuación (27) anotando que la corriente, I_{sc} , que debe considerarse es la del arreglo (*string*) 17.5 A. Con los mismos factores de seguridad y ambiental de la ecuación (28) resulta del cómputo 27.34 A.

$$\text{Protección requerida [A]} = I_{sc} \text{ serie de arreglo [A]} \times \text{Factor seguridad} \times \text{Factor Ambiental} \quad (28)$$

Se adopta breaker (x 3 unidades) de corriente directa, CD, de 30 Amperios, los cuales se ubicará en el cable con polaridad positivo (+) como sigue: Entre barraje de la caja de conexión circuito fuente y el controlador de carga, Entre el controlador de carga y el arreglo de baterías y, entre borne conexión batería y el puerto de conexión del inversor. En cuanto al lado de corriente alterna las protecciones para el lado de corriente alternan, es decir, entre el inversor y los puntos de conexión (caja de distribución) para los circuitos de distribución en corriente alterna, CA, serán los requeridas para la operación propia de estos así: Timer programable - Bomba y Controlador de riego - electroválvulas. De la Tabla 13 se obtiene la potencia total requerida en dicha caja de distribución. En este caso es 801.1 W que se proyecta opere a 110 VCA, entonces la corriente de operación de todos los equipos funcionando simultáneamente se determina con la ecuación (24), obtenido por el cómputo 7.29 A. Si se pueden obtener, se deben utilizar breaker para CA de 10 A de capacidad. En el comercio se consiguen de 15 A para este propósito.

- *Barrajes en la caja de conexión de circuitos fuente.* Con el dato del arreglo listado en la Tabla (9) se obtiene el dato para los cálculos respectivos, I_{sc} del arreglo es 17.50 A. Para el caso se afecta por el factor de 2, obteniendo un dato de amperaje para este elemento de $17.50 \text{ A} \times 2 = 35 \text{ A}$. Se adopta una barra de cobre de 35 Amperios.
- *Dimensionado de conductores.* Para todas las conexiones se consideraron conductores de cobre. Para conductores entre circuitos fuente y caja de conexión se proyecta que los arreglos de paneles se instalen en la cubierta de la edificación que consta de tres (3) niveles, aproximadamente 10 metros por encima de la superficie del terreno, utilizando para tal fin soportes adecuadamente fijadas a la estructura en concreto. Se dispondrán los arreglos de paneles fotovoltaicos para que la distancia entre la salida de la serie más alejada a la caja de conexión sean 2 metros. Con esta distancia establecida, se entiende que la caja de conexión estará ubicada en cercanías a los módulos del circuito fuente. Ahora, el dato de corriente y voltaje se determinan con las ecuaciones (29) y (30), respectivamente. Para la corriente se obtienen 17.50 A y para el caso de la tensión 30.30 V.

$$\text{Corriente conductor [A]} = I_{sc} \times \text{Series en paralelo [un]} \quad (29)$$

$$\text{Tensión conductor [V]} = V_{mp} \times \text{Módulos en paralelo [un]} \quad (30)$$

En los registros de temperatura ambiente para el sitio de estudio que se muestran a continuación (Figura 9), se evidencia que la operación de los dispositivos se dará en ambientes con temperaturas mayores de 20 °C, además que puede estar expuesto a los rayos del sol. Por tal motivo, el coeficiente de conductividad térmica para el cobre que se considera para la ecuación (31) es el proyectado para la condición de 50°C, en este caso 50 m/Ω·mm². Los datos anteriores se evalúan en la ecuación (31), y para optimizar la conducción de la corriente por efectos de la caída de tensión permisible, para esta sección debe ser menor al 3 %, por lo que se recomienda el 1 %, obteniendo la caída para 30.30 V el valor de 0.303 V. Se obtiene un área de sección del conductor de cable para instalación solar en cobre de 4.62 mm², es decir, diámetro 2.43 mm. Al adoptar un calibre de cable mayor en denominación, se obtiene el No. 10 AWG (equivalente en área de sección a 5.27 mm², o diámetro de 2.59mm).

$$S [\text{mm}^2] = 2 \times \left(\frac{L [\text{m}] \times I_{sc} [\text{A}]}{52 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2} \right] \times \text{Caída tensión permisible [V]}} \right) \quad (31)$$

```

-BEGIN HEADER-
NASA/POWER SRB/FLASHFlux/HERRA2/ 0.5 x 0.5 Degree Climatologies
22-year Additional Solar Parameter Monthly & Annual Climatologies (July 1983 - June 2005), 30-year Meteorological and Solar Monthly & Annual Climatologies (January 1984 - December 2013)
Location: Latitude 10.4829 Longitude -73.2719
Elevation from HERRA-2: Average for 1/2x1/2 degree lat/lon region = 992.37 meters Site = na
Climate zone: na (reference Briggs et al: http://www.energycodes.gov)
Value for missing model data cannot be computed or out of model availability range: -999
Parameter(s):
T2H_MAX HERRA2 1/2x1/2 Maximum Temperature at 2 Meters (C)
PARAMETER JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC ANN
-END HEADER-
T2H_MAX 29.05 30.35 31.14 30.45 29.11 28.87 29.28 29.24 28.19 26.99 27.01 27.85 28.96

```

Figura 9. Datos temperatura ambiente máxima a 2 metros de altura de la superficie. Estos datos fueron obtenidos del Proyecto de energía del centro de investigación Langley de la NASA (LaRC), financiado a través del programa de ciencias de la tierra y ciencias aplicadas de NASA [17]

Para conductores entre barraje caja de conexión hasta el controlador de carga / inversor / baterías aplican los valores de corriente, tensión, material y ducto igual al cómputo anterior, cambiando la distancia que se proyecta hasta el controlador de carga e inversor por 4 metros. Es decir, se concibe construir a nivel de la cubierta de la edificación en donde se proyecta la instalación de un nicho o gabinete que albergue estos dispositivos, dentro de los que se incluyen las baterías. El cómputo evaluado en la ecuación (31) y para una caída de tensión permisible en esta sección menor al 1 %, se recomienda el 0.5 %, se obtiene una caída de tensión para 30.30 V de 0.1515 V. Se obtiene un área de sección del conductor de cable para instalación solar en cobre de 18.48 mm², es decir, diámetro 4.85 mm. Al adoptar un calibre de cable mayor en denominación, se obtiene el equivalente al No. 4 AWG (equivalente en área de sección a 21.20 mm², o diámetro de 5.19 mm).

Para conductores entre el inversor y la caja de distribución se tiene en cuenta que se consideran instalación equipos y dispositivos operando en CA en proximidades al tanque de almacenamiento de condensados, el cual se ha proyectado ubicar en la parte baja de la edificación. En este caso, la distancia desde el inversor a los puntos de conexión de estos será del orden de 14 metros de distancia, teniendo en cuenta los recorridos o reservas de cables en cajas de paso desde el gabinete, que se proyecta instalar en cubierta, hasta el nicho donde se proyecta alojar a el timer programable / bomba y dispositivos de control de riego. Para el cómputo, evaluado en la ecuación (31), la corriente corresponde a la establecida para la protección del lado de corriente alterna (7.29 A), obtenida en cálculos anteriores con la ecuación (24), y el voltaje 110 VCA. Considerando optimizar la conducción de la corriente, la caída de tensión permisible para esta sección debe ser menor al 3 %, por lo que se recomienda el 1 %, obteniendo la caída para 110 VCA el valor de 1.10 V. Se obtiene un área de sección del conductor de cable para instalación solar de cobre 3.71 mm², es decir, diámetro 2.17 mm. Al adoptar un calibre de cable mayor en denominación, se obtiene el equivalente al No. 10 AWG (equivalente en área de sección a 5.72 mm², o diámetro de 2.59 mm).

- *Sistema de puesta a tierra.* Se conciben realizar 2 puestas a tierra, una para el circuito fuente en CD y otra para equipos en CA. Se proyecta mantener las continuidades de dichas puestas a tierras y la interconexión respectiva usando los barrajes de las cajas de conexión, inversor, controlador de carga, equipos en CA. Cada puesta a tierra constará de una (1) varilla de cobre-cobre de 2.4m de largo con su respectivo conector al conductor en cobre, en este caso No. 6 AWG hasta los barrajes, y para los demás en No. 12 AWG. Así mismo, en los barrajes, equipos o dispositivos se proyecta utilizar los terminales adecuados para cada uno. Con todos los elementos que conforman el sistema fotovoltaico diseñados, la Figura 10 muestra las conexiones respectivas entre dichos dispositivos.

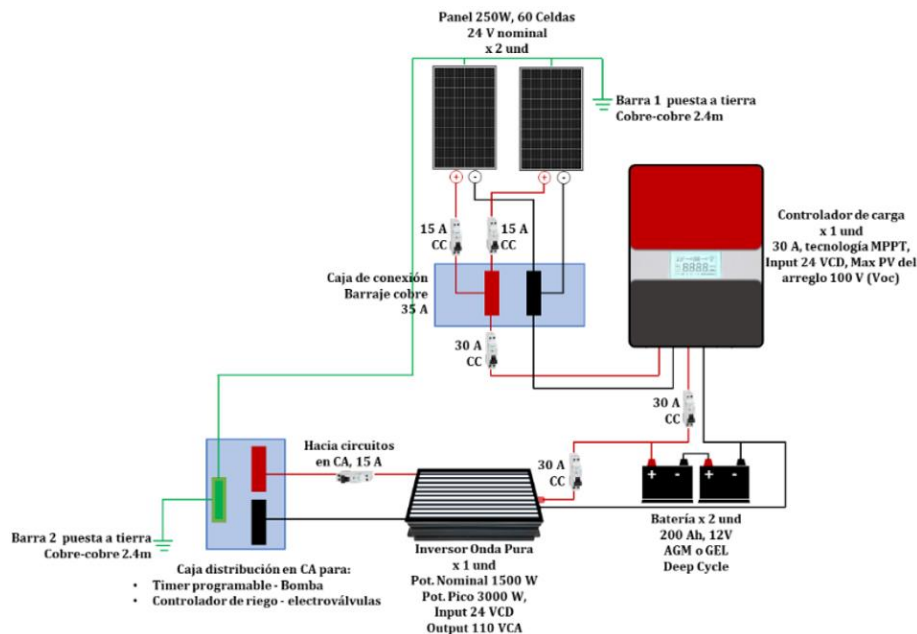


Figura 10. Esquema configuración elementos diseño sistema fotovoltaico propuesto

En la Figura 11 se integran tanto los elementos considerados en el diseño hidráulico como los del fotovoltaico, que en conjunto configuran la propuesta del sistema de riego automatizado operado con energía solar.

4. CONCLUSIONES

Con el estudio se estimó que la tasa de producción diaria de condensados es un poco más de 2 m³/día, que proyectados a un año resultan del orden de 700 m³. Considerando un consumo promedio diario por persona para la población donde se ubica el campus universitario de 140 L/día, el volumen de agua de condensados recuperados para usar en riego equivalen al consumo de agua potable de 14 personas en un día, y alrededor de 5000 personas si se proyecta a

un año. Recuperar los condensados para usarlo en el riego de pastos permitirá disminuir la presión ejercida sobre la fuente hídrica natural del cual se abastece el acueducto municipal, a la vez que permitirá disminuir tanto el consumo como el monto de pago del agua potable que se registra hoy en día en la institución educativa.

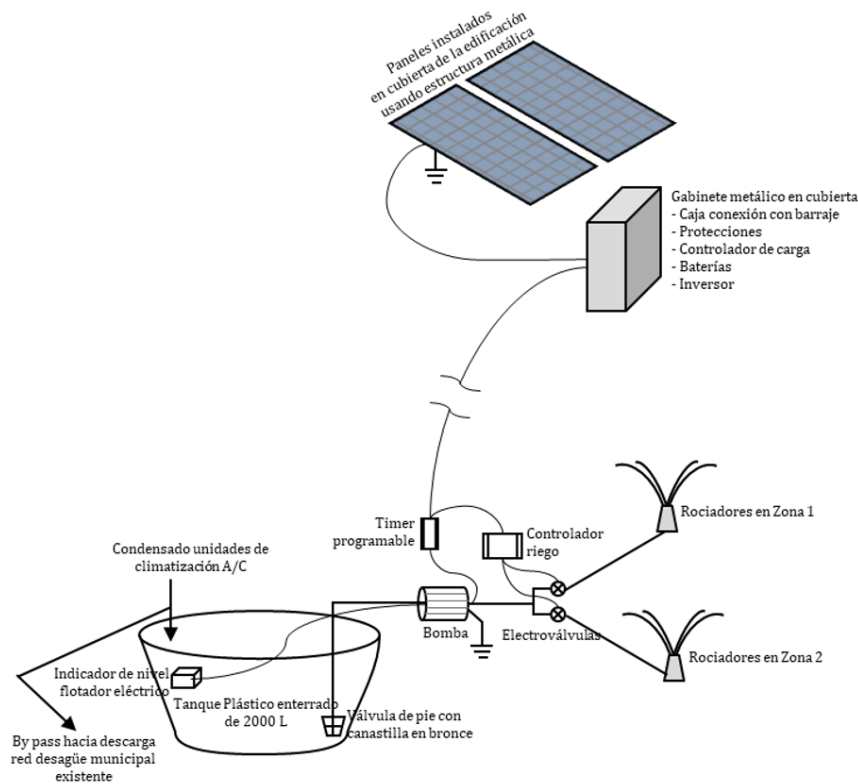


Figura 11. Esquema configuración para sistema de riego automatizado propuesto, operado con energía fotovoltaica

Respecto a la calidad del agua de condensados, se determinó que es apta para usarse en labores de riego de jardines y césped sin requerir tratamiento adicional. Los análisis mostraron niveles adecuados de nutrientes, como los reportan en otros estudios, por lo que puede ser útil para el crecimiento y manutención de la cobertura vegetal de zonas verdes. Así mismo, en algunos estudios se ha establecido que su calidad es similar a la del agua destilada e incluso en algunos proyectan que aplicándoles procesos de desinfección tienen un uso potencial para consumo humano.

Se realizó dimensionamiento hidráulico de elementos del sistema de riego que incluye, entre otros, tuberías, accesorios para control de flujo, tanque para almacenamiento (cap. 2000 L), by pass, equipo de presión (pot. 750W - 110VCA) y controlador de riego con sus respectivas electroválvulas y aspersores tipo emergentes. Se determinó que el sistema de riego opere solo en las horas de la noche para evitar al máximo la evaporación del agua, además de evitar causar molestias a usuarios de las instalaciones.

Con niveles favorables de irradiación solar, 4.87 kWh/m²/día, y para las 7 horas de sol por día que registra la zona donde se ubica el estudio, se desarrolló una configuración operando fuera de red con energía fotovoltaica. Se espera que la implementación de energía autosustentable para el funcionamiento de los equipos de presión y control de riego generen un efecto positivo sobre el medio ambiente, brindando un sistema con energía limpia, renovable, sin emisiones contaminantes y sin pago periódico de consumo de servicio eléctrico. Además, con la automatización del sistema de riego se busca la autonomía necesaria para que la intervención de personal de apoyo solo sea necesaria en actividades de mantenimiento rutinario y preventivo del sistema. En caso que se requiera aumentar el nivel de desempeño del sistema, podría programarse para que, en vez de atender en un mismo día la demanda de la Zona 1 y Zona 2, solo se atienda la de una zona y al día siguiente la de la otra.

El presente estudio contrasta con la marcada tendencia de los documentados en las referencias, donde prevalecen aquellos registrados en zonas climáticas subtropicales que tienen cuatro estaciones climáticas. El sitio donde se desarrolló el presente estudio se ubica en plena zona tropical y se destaca la característica de no registrar drásticas variaciones de temperatura ambiente a lo largo del año que, por ser elevadas - aproximadamente 29°C -, conducen a la particularidad que en los recintos de edificaciones se cuentan con equipos de climatización que operan con energía obtenida, en su mayoría, por la combustión de combustibles fósiles. Por lo anterior, para aquellas zonas urbanas o rurales ubicadas en regiones donde se presente escasez del agua y se registren condiciones climáticas similares a las del sitio de estudio, la alternativa propuesta para el aprovechamiento de los condensados para riego automatizado de jardines puede utilizarse como una guía que permita replicar, escalar y adaptar dicha configuración.

REFERENCIAS

- [1] A. Angelakis and S. A. Snyder. "Wastewater Treatment and Reuse: Past, Present, and Future". *Water - Open Access Journal*, vol. 7, pp. 4887-4895, 2015.
- [2] J. Koeller and K. Hammack, "Addressing unnecessary water waste in buildings", *ASHRAE Journal's Guide to Standard 189.1*, Jun., pp. 16-20, 2010.
- [3] L. Sisco, S. Monzer, N. Farajalla, I. Bashour and I. P. Saoud, "Roof top gardens as a means to use recycled waste and A/C condensate and reduce temperature variation in buildings", *Building and Environment*, vol. 117, pp. 127-134, 2017.
- [4] M. Hastbacka, J. Dieckmann and J. Brodrick, "'Smart' Irrigation Systems", *ASHRAE Journal*, vol. 54, Aug., pp. 76-78, 2012.
- [5] Algarni S., C. A. Saleel and M. A. Mujeebu, "Air-conditioning condensate recovery and applications - Current developments and challenges ahead". *Sustainable Cities and Society*, vol. 37, pp. 263-274, 2018.
- [6] T. Lawrence and J. Perry, "Capturing Condensate", *High Performing Buildings*, pp. 56-61, 2010.
- [7] A. Magrini, L. Cattani, M. Cartesegna and L. Magnani, "Integrated systems for air conditioning and production of drinking water - Preliminary considerations" in The 7th International Conference on Applied Energy - ICAE2015, *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1659-1665, 2015.
- [8] A. Al-Farayedhi, N. I. Ibrahim and P. Gandhidasan, "Condensate as a water source from vapor compression systems in hot and humid regions", *Desalination*, vol. 349, pp. 60-67, 2014.
- [9] A. Hamiche, A. B. Stambouli and S. Flazi. "A review of the water-energy nexus", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 319-331, 2016.
- [10] Revised Air Conditioner Condensate Calculator Available on BuildingGreen.com, Sept., 2010. [Online]. Available: <https://www.buildinggreen.com/blog/revised-air-conditioner-condensate-calculator-available-buildinggreencom>.
- [11] Instituto Colombiano de Normas Técnicas - ICONTEC, *NTC 1500 Código colombiano de instalaciones hidráulicas y sanitarias*, Tercera actualización, 2017.
- [12] Cálculo de las necesidades diarias de agua, 2019. [Online]. Available: <http://elriego.com/informacion-tecnica/calculos/calculos-agua-tiempos-riego/calculo-necesidades-diarias-agua>. [Accessed Apr. 8, 2019].
- [13] C. Silva, M. G. Gomes and M. Silva, "Green Roofs Energy Performance in Mediterranean Climate". *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 318-325.
- [14] Hunter Industries Incorporated, "The Handbook of Technical Irrigation Information", 2015. [Online]. Available: <https://www.hunterindustries.com>. [Accessed Apr. 8, 2019].
- [15] Hunter Industries Incorporated, "Product Catalogue Volume 37", 2018. [Online]. Available: <https://www.hunterindustries.com>. [Accessed Apr. 8, 2019].
- [16] Hunter Industries Incorporated, "Residential sprinkler system design and installation guide", 2018. [Online]. Available: <https://www.hunterindustries.com>. [Accessed Apr. 8, 2019].
- [17] National Aeronautics and Space Administration - NASA, "Power Data Access Viewer Prediction of Worldwide Energy Resource", 2018. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>. [Accessed Apr. 8, 2019].
- [18] S. M. Wazeda, B. R. Hughes, D. O'Connor and J. K. Clautit. "Solar Driven Irrigation Systems for Remote Rural Farms" in the 9th International Conference on Applied Energy, ICAE2017, *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 184-191, 2017.
- [19] S. Chandel, M. N. Naik and R. Chandel. "Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1084-1099, 2015.
- [20] V. B. Shinde and S. S. Wandre, "Solar photovoltaic water pumping system for irrigation: A review", *African journal of agricultural research*, vol. 10, pp. 2267-2273, 2015.
- [21] W. Shao, M. Zhu, J. Liu, B. Weng, C. Xiang, J. Gong, N. Wang and G. Yang, "Photovoltaic Water Lifting and Ecological Water Supplement for Xiang'an Water System in Xiamen City" in 9th International Conference on Applied Energy, ICAE2017, *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 230-235, 2017.
- [22] A. Brahmi, A. Abounada, G. Chbirik and A. E. Amrani, "Design and optimal choice of a 1.5 kW photovoltaic pumping system for irrigation purposes" in 1st International Congress on Solar Energy Research, Technology and Applications (ICSERTA 2018), *AIP Conference Proceedings*, vol. 2056, No. 1, pp. 2018.
- [23] R. Foster, A. Cota, "Solar water pumping advances and comparative economics" in 2013 ISES Solar World Congress, *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1431-1436, 2014.
- [24] B. Vick and R. N. Clark, "Determining the Optimum Solar Water Pumping System for Domestic Use, Livestock Watering or Irrigation" presented at 38th ASES Annual Conference, Buffalo, New York, 2009.

Vigilancia tecnológica para orientar la enseñanza de la geometría en Ingeniería Civil con apoyo de TIC

John J. García M.¹

Sonia J. Moreno J.²

Instituto Tecnológico Metropolitano – Colombia

Este capítulo presenta el resultado de una Vigilancia Tecnológica cuyo objetivo principal, consistió en realizar un inventario de los esfuerzos individuales o colectivos, realizados por la comunidad académica en torno a las estrategias para llevar al aula de Ingeniería Civil; las nuevas tendencias pedagógicas en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la geometría desde el ambiente pedagógico y tecnológico conocido como la Tecnología Educativa, teniendo en cuenta que esas tendencias facilitan, la conexión entre el conocimiento, los medios tecnológicos y la didáctica. Esas nuevas preferencias en la enseñanza no solo de la geometría tienden a involucrar el aspecto tecnológico en la existencia de un aprendizaje con calidad con el apoyo de las Tecnologías de la Información y Comunicación -TIC- y fueron la base para establecer ecuaciones de búsqueda ideales que permitieron lograr la Vigilancia Tecnológica propuesta. En un primer momento se analizan las competencias geométricas necesarias para la solución de problemas reales de un curso regular de geometría y un segundo momento se describen los requerimientos de la alfabetización profesor necesarios para llevar materiales concretos al aula de los futuros ingenieros civiles. Para ajustar nuestras ecuaciones de indagación, se analizan las bondades de tres modelos de inserción de la tecnología en el aula: el modelo Technological Pedagogical Content Knowledge, el modelo Substitution, Augmentation, Modification, Redefinition y el modelo Aprendizaje y Actividades Polifásicas, y por último, se presenta el resultado de los hallazgos realizados en el espacio académico acerca de la enseñanza de la geometría con TIC, bajo estos tres modelos de inserción de la tecnología en el aula durante el quinquenio 2013-2018.

1. INTRODUCCIÓN

El saber geométrico, desde los Babilonios, los egipcios y los griegos se ha dado a conocer a través de axiomas, postulados y teoremas que han permitido darle el carácter de ciencia a la geometría y para transmitir ese conocimiento se evolucionado de la regla y el compás hasta lo que hoy se conoce como geometría dinámica o geometría apoyada con TIC [1], las hipótesis tradicionales no son el punto de partida sino los datos recopilados que permiten generar conjeturas geométricas.

La geometría dinámica vigente en el ecosistema educativo gobernado por las herramientas digitales surge de la necesidad de transmitir el conocimiento que conlleva a la medida y la forma de las creaciones humanas, es en este ambiente donde los profesores sienten la necesidad de pasar de la tiza y la pizarra de antaño a crear nuevos modelos mediante transformaciones digitales, no desde el punto de vista de la tecnología sino como un cambio de mentalidad para transmitir el conocimiento, implica la transformación del ser humano [2], la normalización del uso apropiado de las TIC y un proceso constante de capacitación tecnológica y pedagógica, para los maestros podría ayudar a empoderar el aprendizaje de los estudiantes.

La comunicación del conocimiento geométrico con el apoyo que brindan los materiales concretos en la geometría dinámica [3], comprenden entornos de aprendizaje con actividades que les facilitan a los estudiantes una participación activa, aumentan el interés por los conceptos que de una u otra forma facilitan construir su conocimiento. Por tanto, *es una oportunidad de mejorar la calidad y profundidad del aprendizaje de los estudiantes, y de personalizar el aprendizaje, lo que de inmediato lleva a ver las posibilidades que esto tiene para una escuela que se preocupa por desarrollar el talento, no por transmitir conocimientos de manera lineal con escasa adaptación a las necesidades de sus escolares más o menos capaces* [4].

2. MARCO TEÓRICO

2.1 La geometría y su enseñanza como justificación matemática del entorno

Al igual que en cualquier proceso de enseñanza en el área matemática o la geometría con herramientas TIC, se deben incluir formulaciones, tratamiento y resolución de problemas, el razonamiento, la comunicación y el modelado que no es otra cosa que la matematización entendida como la adaptación a la vida cotidiana mediante la reconstrucción mental de esquemas científicos idealizados con el objetivo de optimizar las habilidades geométricas básicas (visualización-diseño-construcción-transferencia) [5], es necesario que los estudiantes: Interpreten datos geométricos que se les presentan en forma de tablas, gráficas, esquemas, símbolos y expresiones verbales, para lograr la generación de representaciones diversas tomando como insumo los datos interpretados.

Formulen y ejecuten procesos relacionados con la identificación del problema y el diseño de estrategias adecuadas para solución de la situación planteada; además del tratamiento de datos, la modelación y el uso de herramientas cuantitativas de tipo aritmético, métrico, algebraicas y de geometría. Evalúen y validen procesos relacionados con la

¹ jogalaxyhn@gmail.com

² jaquemj24@gmail.com

verificación de resultados, hipótesis o conclusiones que se derivan de la interpretación y de la modelación de situaciones.

2.2 El profesor de la era TIC

La docencia en el mundo TIC ha asignado a los profesores un nuevo rol [6]: ser mediador en un escenario de aprendizaje que cada vez busca apoyar sus procesos formativos en el uso intencionado de una cantidad de recursos digitales, pero su uso en el aula debe ser dirigido de tal forma que con metodologías adecuadas se logre una verdadera calidad del conocimiento adquirido por los estudiantes [7] ello, nos lleva a uno de los modelos actuales: el Blended Learning también conocido como Híbrido o combinado, modelo que [8] les puede permitir a los estudiantes lograr el conocimiento y además, les facilita cultivar sus habilidades de colaboración, pensamiento y aprendizaje autónomo e innovación. Es el tipo de aprendizaje que se caracteriza por presentar actividades cara a cara complementadas con otras basadas en tecnología que agrupan recursos de aprendizaje que son [9]: “herramientas de software o hardware, que sirven para apoyar los contenidos y facilitar el aprendizaje de los estudiantes, entre los que se encuentran: guías, glosarios, vídeos, imágenes, recursos indexados, enlaces a sitios web” y quizá lo más importante: las guías de tareas (Job aids) que se utilizan mientras se está realizando la tarea y dirige al estudiante en el proceso de concluir la misma o el procedimiento correctamente.

La era digital que hoy vivimos permite que nuestros estudiantes posean determinadas características entre las que podemos destacar: estar siempre inmersos en ella, tener acceso a video juegos, mensajes de correo y de texto, búsqueda y descarga de música, pero ¿y de su aplicabilidad en la educación por parte de ellos qué? Aunque la comunicación es un elemento motivador, los estudiantes no la utilizan como una posibilidad tecnológica para enriquecer sus experiencias de aprendizaje y a diario surgen nuevas posibilidades TIC que los van alejando de la práctica de su aprendizaje, es aquí donde el profesor debe intervenir para subsanar esas fallas, pero, ello requiere una alfabetización profesor en TIC.

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [10], publicó en el año 2008 el documento denominado “Estándares de Competencia en TIC para Profesores”, documento de orientación al manejo de TIC para que un profesor intervenga la transmisión del conocimiento con el apoyo de las mismas. Una de las orientaciones estaba enfocada hacia la profundización del conocimiento en TIC y su objetivo principal es la aplicación de los conocimientos del profesor en esas tecnologías en sus aulas para que los estudiantes puedan resolver problemas complejos. Desde este punto de vista, el problema radica en la necesidad de aumentar la capacidad de los estudiantes para que, como potencia productiva del saber puedan agregar valor a su conocimiento [11] y por ende a la sociedad al solucionar problemas reales.

Desde la óptica de la alfabetización digital profesor para intervenir el aula con TIC debe responderse a tres preguntas básicas: ¿qué enseñar? ¿Cómo enseñar? ¿Con qué enseñar? con esto en mente surgen otras con respecto a la evaluación: ¿qué y cuándo evaluar? [12]. Así que, resolviendo estas preguntas, la formación se ha de orientar a los contenidos, a la pedagogía con el uso de las TIC y tecnología disponible [13]. Asimismo, un modelo conceptual para identificar y evaluar las Prácticas de Desarrollo Profesor relacionadas con el uso de las TIC para transformar la educación en respuesta a un cambio social más amplio, expresado de otra manera el profesor de la era TIC tiene un gran reto: el cambio de rol para sobrevivir en el ecosistema de las Tecnologías de la Información y la Comunicación.

El principal rol del profesor de Educación Superior es ser mediador en un escenario de aprendizaje real que cada vez busca apoyar sus procesos formativos en el uso intencionado TIC especialmente en el área de las matemáticas, para definir un estilo profesor [14]. Crear ambientes de aprendizaje con herramientas digitales para el trabajo independiente de los estudiantes requiere que esos materiales sean elaborados para ser utilizados de manera sincrónica, según los horarios establecidos en la presencialidad del aprendizaje o asincrónicos según las características y necesidades de los estudiantes.

Por lo anterior, es conveniente efectuar una vigilancia tecnológica que aquí se describe se fundamenta en tres modelos de inserción de la tecnología en el aula donde los denominados objetos de aprendizaje juegan un papel primordial para la adquisición de conocimientos.

2.3 Los objetos de aprendizaje

El Comité de Estándares de Tecnologías de Aprendizaje (LTSC) presenta la siguiente definición:

Un objeto de aprendizaje es cualquier entidad, digital o no digital, la cual puede ser usada, re-usada o referenciada durante el aprendizaje apoyado por tecnología. Ejemplos de aprendizajes apoyados por tecnologías incluyen sistemas de entrenamiento basados en computador, ambientes de aprendizaje interactivos, sistemas inteligentes de instrucción apoyada por computador, sistemas de aprendizaje a distancia y ambientes de aprendizaje colaborativo. Ejemplos de objetos de aprendizaje incluyen contenidos multimedia, contenido instruccional, objetivos de aprendizaje, software instruccional, y herramientas de software, y personas, organizaciones o eventos referenciados durante el aprendizaje apoyado por computador [15].

En geometría, al profesor del tercer entorno [16] se le solicita una competencia digital para lograr los objetivos que sus estudiantes se proponen en su aprendizaje, esa competencia se traduce en los conocimientos que le permitan el uso crítico y creativo de los recursos TIC como Objetos Virtuales de Aprendizaje (OVA) [17], son recursos propicios para potencializar las competencias de los estudiantes y por su facilidad de uso para complementar el aprendizaje en los cursos presenciales y virtuales, Ambientes Virtuales de Aprendizaje (AVA) facilitadores del trabajo colaborativo donde se adquiere un sentido de percepción conjunta [18] y Objetos Interactivos de Aprendizaje (OIA) que por su interactividad permiten la construcción y reafirmación del conocimiento teórico [19], entre muchos recursos TIC existentes para facilitar el aprendizaje.

Esa competencia para enseñar con herramientas TIC, en el marco Europeo de la Competencia Digital Profesor [20], implica la planificación e implementación de recursos digitales en el proceso de enseñanza a través de diferentes dispositivos, a fin de optimizar la eficacia de las intervenciones profesores. Ello se traduce en gestionar y orquestar adecuadamente el conocimiento experimentando y desarrollando aplicaciones con nuevos formatos como el Internet de las cosas [21] y métodos pedagógicos para la instrucción.

Ahora bien, es de gran importancia el conocimiento de los conceptos o definiciones de los recursos TIC mencionados en este documento, así entonces, iniciando con la definición de OVA, y teniendo presente que existen distintas versiones, ya que su definición aún no se ha estandarizado. Por ejemplo, en Colombia, según el portal de Colombia Aprende: la red del conocimiento, un OVA, es:

Un conjunto de recursos digitales, que pueden ser utilizados en diversos contextos, con un propósito educativo y constituido por al menos tres componentes internos: contenidos, actividades de aprendizaje y elementos de contextualización. Además, el Objeto de Aprendizaje, debe tener una estructura de información externa (metadato), para facilitar su almacenamiento, identificación y recuperación.

Ante tantas definiciones que se encuentran los OVA no tienen una definición estandarizada, pero si podemos expresar que es un campo de acción innovador en la educación en cuanto a las aplicaciones TIC se refiere, este recurso innovador permite un proceso de aprendizaje autónomo y autorregulado donde el estudiante aplica sus conocimientos en TIC, en el que se logran desarrollar los conceptos básicos [22], [23]. Por tal razón, el OVA ha de cumplir ciertas características, es decir, debe dar cumplimiento al objetivo propuesto, a través de los siguientes componentes que ha de contener de manera explícita:

- *Objetivos*: éstos expresan en forma clara lo que el estudiante va a aprender
- *Contenidos*: hacen referencia a todos aquellos conocimientos que se han de adquirir, por lo tanto, ha de llevar definiciones, explicaciones, lecturas, animaciones, simulaciones, entre otros.
- *Actividades de aprendizaje*: estas guiarán al estudiante para el logro de los objetivos propuestos.
- *Interoperabilidad*: es decir, que pueda ser utilizado en plataformas diferentes.
- *Ser reutilizable*: ello significa que pueda ser utilizado por diferentes maestros en distintos contextos de enseñanza.
- *Que sea durable* y se pueda actualizar con el tiempo, igualmente debe ser breve y sintetizado.

Los recursos digitales han permitido la evolución del OVA hacia los OIA que, debido a su carácter dinámico y visual, la utilización de OIA y de videos implementados en la plataforma del curso de geometría dinámica resulta ser una herramienta de gran ayuda para los procesos de enseñanza y aprendizaje que llevan a la comprensión de sus conceptos y propiedades. En efecto, al ser implementados tanto videos como OIA por el profesor dentro de sus estrategias didácticas, hace más fácil la construcción de los conceptos por parte del estudiante y permite, de manera más sencilla, evidenciar obstáculos que retrasan dicho proceso. Igualmente, permite que el estudiante pueda acercarse al concepto desde diferentes contextos, logrando así, de manera más rápida y eficiente un aprendizaje significativo, que [24] cuando “el estudiante, como constructor de su propio conocimiento relaciona los conceptos a aprender y les da sentido a partir de la estructura conceptual que ya posee”.

Dado que el diseño estructural de los OIA hace parte del diseño de los contenidos educativos digitales, es necesario tener en cuenta los siguientes elementos de diseño:

- *Interactividad* [25], como “el control parcial del usuario sobre la presentación de la información es la característica que distingue a los documentos multimedia de otros donde encontramos la imagen en movimiento combinada con gráficos, sonido y texto”, expresado de otra forma es la característica que permite al usuario establecer un canal de doble vía para recibir información de parte del OIA y entregar nueva información como respuesta al mismo OIA. Es importante para el OIA la utilización de “campos de entrada”, ya sean numéricos o alfanuméricos, para el ingreso de texto y números por parte del estudiante y que corresponden a su propuesta de solución; la utilización de botones dentro del OIA, que brindan pistas sobre el problema o ejercicio planteado, permiten ir paso a paso en la construcción de un concepto, observar una figura u otra según la necesidad del estudiante, avanzar o retroceder a través de la escena planteada por el OIA, generar un nuevo ejercicio, ya sea aleatorio o en grado de dificultad incrementado.

- *Aleatoriedad*, característica que permite al usuario variar bien sea algún parámetro cuantitativo o cualitativo en el problema o ejercicio, el tipo de ejercicio o el tipo de pregunta, de manera que se planteen situaciones distintas cada vez. Así, con la utilización de un botón que genera aleatoriedad, por ejemplo, se induce al estudiante a adaptarse a diferentes situaciones, a analizar la información suministrada y plantear una solución.
- *Retroalimentación inmediata* que puede ser simple: un contador de aciertos y fallos, o una *feedback* más elaborado como la aparición de mensajes relacionados con el logro de una respuesta a un problema o ejercicio, o una imagen alusiva al logro de la solución. La retroalimentación también incluye la aparición de mensajes con pistas para intentar nuevamente la solución o una explicación de cuál sería la solución según las condiciones en la escena OIA.
- *Portabilidad*, es decir, acceder a los recursos desde diferentes dispositivos y sistemas operativos (teléfonos móviles, tabletas y portátiles).

Por otro lado, el proceso, las experiencias y los múltiples aprendizajes durante la ejecución de un Objeto Interactivo de Aprendizaje, si permiten plantear asuntos claves para la discusión de la pertinencia de implementar los OIA en las clases de geometría. La experiencia obtenida de la literatura acerca de los estudios comparativos en matemáticas permite entre otros planteamientos se necesario el control de variables como: profesor, estilo de enseñanza, horarios, herramientas de apoyo como software, calculadoras y equipos de cómputo, mediadores y mediaciones en la línea de Geometría para la Educación Superior, así como el uso de estrategias metacognitivas [26], de parte de los estudiantes para solucionar problemas de matemáticas:

- Entender y analizar el problema
- Planificar un plan de resolución
- Organización de datos
- Solucionar el problema
- Evaluar el proceso y el resultado obtenido.

Esto no es nada nuevo, es la teoría descrita por George Polya¹ en su conocido *How to solve it* publicado en el año 1945.

3. MODELOS PARA LLEVAR AL AULA DE GEOMETRÍA RECURSOS TIC

Las TIC en los procesos de enseñanza y aprendizaje no son un fin, son una herramienta que debe ser planificada de tal manera que esos recursos no sean piezas sueltas de un engranaje que gira sobre sí mismo sin transmitir ninguna ganancia como muchos de los que se encuentran en la Web y cuyo número se incrementa cada vez más pero que no le aporta nada a la sociedad educativa y mucho menos a las necesidades del estudiante para incrementar su aprendizaje [27]. Para ello deben existir ciertas consideraciones [28] y de las que destacamos:

- Una selección de los recursos digitales más apropiados para satisfacer las deficiencias que la implementación de un modelo teórico - pedagógico puede alimentar en el proceso de aprendizaje de un estudiante de acuerdo a su nivel educativo.
- Diseño de actividades con herramientas TIC para realización en el aula física como en las aulas virtuales (léase trabajo independiente del estudiante).
- Divulgación de los materiales concretos diseñados para cada uno de los entornos interactivos y colaborativos que favorezcan los procesos de enseñanza-aprendizaje.

3.1 El modelo TCPK

Desarrollado entre el 2006 y 2009 por los profesores Punya Mishra y Matthew J. Koehler, de la Universidad Estatal de Michigan, el TPACK es el acrónimo de la expresión “Technological Pedagogical Content Knowledge”, se describe como un modelo que identifica los tipos de conocimiento que un profesor necesita dominar para integrar las TIC de una forma eficaz en la enseñanza que imparte enmarcados la disciplina particular de un área del conocimiento, la orientación pedagógica y el saber tecnológico [29]. El modelo TPACK se centra en la importancia del Conocimiento (K-Knowledge) sobre el Contenido (C-Content), la Pedagogía (P-Pedagogy) y la Tecnología (T-Technology), así como los conocimientos sobre las posibles interrelaciones. Estos tres dominios son inseparables [30] así haya algunas diferencias en la particularidad del conocimiento o diferencias de contenido y de pedagogía para lograr su cometido.

3.2 El modelo SAMR

Propuesto por Rubén Puentedura [31] el modelo establece cuatro niveles de inserción de la tecnología en el aula: Sustitución, Ampliación, Modificación y Redefinición, de sus siglas en inglés surge el acrónimo del modelo SMAR

¹ Originario de Budapest (Hungría), su obra publicada por la Universidad de Princeton ha sido traducida a muchas lenguas y vendidos millones de copias. En su obra presenta un conjunto de sugerencias que permiten solucionar de manera más fácil. La primera traducción al español data del año 1965.

(Substitution, Augmentation, Modification, Redefinition) y se refiere al proceso de integración de TIC en el diseño de actividades y se justifica desde la necesidad de mejorar la calidad de la enseñanza y garantizar un sistema de promoción social que garantice la equidad desde una implementación adecuada la tecnología en las matemáticas. La implementación del modelo se realiza en dos etapas y cada una de ellas involucra dos procesos, en la primera de ellas:

1. Etapa de Sustitución: la tecnología permite el cambio de la tiza y el tablero a pizarras a base de bits.
2. Etapa de Ampliación: se hacen algunas mejoras al proceso, la tecnología es un sustituto que permite ver más allá de una pizarra, pero los conceptos teóricos son los mismos que se trabajase sin esa tecnología.

La segunda etapa involucra los procesos:

1. Etapa de Modificación: la tecnología es utilizada para crear asignaciones en las que el uso de las tecnologías es determinante para poder llevarlas a cabo, para lograr efectividad del Apoyo pedagógico del entorno informativo y educativo [32].
2. Etapa de Redefinición: las tareas asignadas solo pueden lograrse a través del uso de la tecnología.

3.3 Modelo EAAP

Es un modelo que se refiere a los Estilos de Aprendizaje y Actividades Polifásicas [33], fundamentado en el estilo Activo (A) [34] como el conjunto de metodologías que convierten al estudiante en el responsable de su aprendizaje, el estilo Pragmático (P) [35] está relacionado con la teoría emancipatoria de la enseñanza, el estilo [36] como aquél fundamentado en modelos teóricos que faciliten la forma de aprender denominado estilo Teórico (T) y por último, el estilo Reflexivo (R) enfatizado por la tendencia a resolver situaciones ambiguas y poco claras [37], partiendo del análisis de diferentes puntos de vista. El modelo EAAP permite identificar nueve zonas donde se combinan esos cuatro estilos para el diseño de recursos digitales y cuatro zonas individuales, son las que se deben tener en cuenta al momento de diseñar recursos digitales. Es de resaltar que la zona donde convergen los cuatro estilos de aprendizaje requiere que el profesor tenga los suficientes conocimientos para crear páginas web con contenidos multimedia, videos interactivos, objetos Virtuales de Aprendizaje y quizá lo más importante: saber evaluar.

4. LA VIGILANCIA TECNOLÓGICA

[38]La vigilancia tecnológica es el proceso organizado, selectivo y sistemático, para captar información del exterior y de la propia organización sobre ciencia y tecnología; seleccionarla, analizarla, difundirla y comunicarla, para convertirla en conocimiento con el fin de tomar decisiones con menor riesgo y poder anticiparse a los cambios, esas decisiones para nuestro caso dependen de los hallazgos exitosos para llevar la geometría dinámica al aula. En una correcta planeación de una vigilancia tecnológica se debe identificar las necesidades y factores críticos o claves; observar y captar información; analizarla y organizarla para ser almacenada; dar valor añadido a la información con fuentes secundarias, y finalmente elaborar el informe para el proyecto. Definida por la propia entidad, Scopus es la mayor base de datos de citas y resúmenes de literatura revisada por pares: revistas científicas, libros y actas de congresos, la búsqueda de información durante el quinquenio 2013-2018 se realizó empleando las siguientes ecuaciones:

4.1 Technological Pedagogical Content Knowledge AND Geometry AND Teaching

Se encontraron seis documentos de los cuales el 50% de ellos corresponde a artículos, 16.67% a capítulos de libro, 16.67% a libros y el 16.67% a documentos de conferencia, en la Figura 1 se evidencia el área temática donde los mismos autores publican en ese mismo periodo de tiempo.

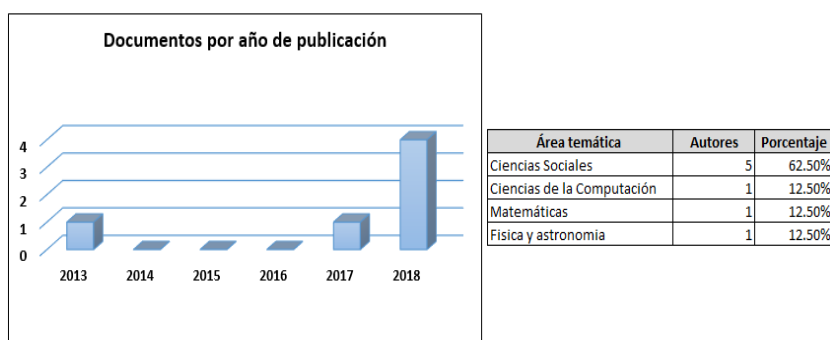


Figura 1. Resumen hallazgos TPACK ecuación de búsqueda 1

De estos resultados destacamos los siguientes documentos, uno de ellos en el campo de las Ciencias Computacionales y otro en el campo de las matemáticas:

- [39] documentan los resultados de un taller para profesores donde se analizaron el conocimiento acerca de uno de los softwares de geometría dinámica más populares: GeoGebra, luego analizaron el proceso de construcción de objetos geométricos con dicha herramienta y su inserción en el aula. A partir de los resultados llegan a la conclusión de que el conocimiento se puede dividir en dos grupos: TPACK constructivo y TPACK obstructivo.
- [40] un plan de desarrollo profesional realizado durante dos años para profesores de geometría secundaria en la integración de la geometría dinámica en la enseñanza, el resultado de ese trabajo mostró que el TPACK de los maestros tendía a permanecer dentro de los tres niveles medios de TPACK: aceptar, adaptar y explorar.
- TPACK AND Geometry AND Teaching.

En el marco de esta ecuación de rastreo se encontraron siete documentos que corresponden a diez autores donde el 57.10% de ellos corresponde a artículos publicados, el 28.60% a capítulos de libro y el 14.30% a documentos de conferencia. Este resultado se aprecia en la Figura 2, donde se evidencia el área temática donde los mismos autores publican en el quinquenio descrito.

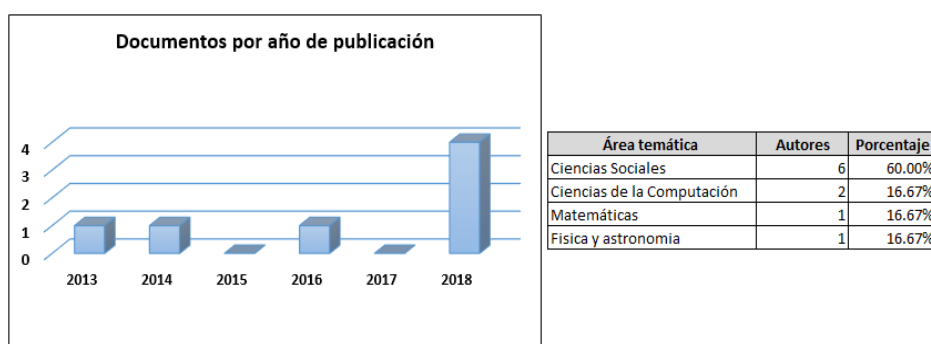


Figura 2. Resumen hallazgos TPACK ecuación de búsqueda 2

4.2 Substitution, Augmentation, Modification, Redefinition AND Geometry AND Teaching

Con la ecuación de búsqueda 3 acerca del modelo de Rubén Puentedura no se encontraron resultados.

4.3 SAMR AND Geometry AND Teaching

La ecuación de búsqueda que incluye el acrónimo del modelo de Substitution, Augmentation Modification y Redefinition no brindó ningún dato que se relacionase con la geometría y la enseñanza.

4.4 Learning Styles and Polyphasic Activities AND Geometry AND Teaching

Con la ecuación de búsqueda 5 acerca del modelo de los Estilos de Aprendizaje y Actividades Polifásicas en el idioma inglés no mostró resultados.

4.5 Estilos de Aprendizaje y Actividades Polifásicas AND Geometry AND Teaching

Con la ecuación de búsqueda 6 acerca del modelo de los Estilos de Aprendizaje y Actividades Polifásicas en el idioma inglés no mostró resultados.

5. CONCLUSIONES

Acorde con los datos encontrados se observa que el modelo TPACK brinda las mayores libertades para introducir la tecnología en el aula de geometría y que podemos observar en la Tabla 1 descrita en una experiencia [41].

Tabla 1. Análisis de los modelos descritos en la vigilancia realizada

Modelo	Ventajas	Desventajas
TPACK	Permite diseñar actividades sin requerimientos tecnológicos. Permite aplicar los diseños instruccionales desde diferentes ópticas. Facilitar el fomento de actividades para modelos de trabajo digital o no digital. Es ideal para procesos de enseñanza y aprendizaje con modelos Híbridos. Proporciona simulaciones que ofrecen entornos para la observación, exploración y la experimentación. Evaluar permanentemente la práctica profesional y reflexionar sobre ella para llevar a cabo labores de innovación y mejora continuas o permanentes.	Requiere un equipo profesor y técnico que permita la coexistencia del conocimiento, la pedagogía y la tecnología. Si aplica en entornos 100% virtuales no despierta la motivación de los participantes del proceso de enseñanza y aprendizaje.

REFERENCIAS

- [1] M. D. Pochulu, "Significados atribuidos a la resolución de problemas con software de geometría dinámica durante un desarrollo profesional profesor," *Rev. Latinoam. Investig. en Matemática Educ.*, vol. 13, no. 30, pp. 307–336, 2010.
- [2] J. P. Hoz, "Cómo mejorar el papel de las TIC para promover una educación empoderadora en el desarrollo sostenible," *Rev. Psicol. Ciències l'Eduació i l'Esport*, vol. 36, no. 2, pp. 43–55, 2018.
- [3] M. Tezer, "The effect of answer based computer assisted geometry course on students success level and attitudes," *Qual. Quant.*, vol. 52, no. 5, pp. 2321–2329, Sep. 2018.
- [4] J. Tourón, "¿Conoces las diferencias entre el uso y la integración de la tecnología en la clase?," 2014. [Online]. Available: <https://www.javiertouron.es/conoces-las-diferencias-entre-el-uso-y/>. [Accessed: 13-May-2016].
- [5] Y. Pisco, S. P. Gonzalez, "Aplicación de un dispositivo didáctico basado en el modelo holístico del pensamiento geométrico para mejorar la cognición espacial en problemas de análisis vectorial," *Rev. Mex. Física E* 64 70–80, vol. 64, no. 11, pp. 1–11, 2017.
- [6] L. S. Keiler, "Teachers' roles and identities in student-centered classrooms," *Int. J. STEM Educ.*, vol. 5, no. 1, p. 34, Dec. 2018.
- [7] Á. Ezquerro A., M. E. Burgos M.E., J. Manso J., and J. Mafokozi J., "Análisis del tratamiento de contenidos en la creación de audiovisuales educativos (parte II): las progresiones detectadas," *Rev. Eureka sobre enseñanza y Divulg. las ciencias.*, vol. 16, no. 2, pp. 1–13, Jan. 2019.
- [8] C. Zheng, "Application of Performance Technology and Blended Learning in Course Design of Students," *Educ. Sci. Theory Pract.*, vol. 18, no. 6, pp. 3125–3134, 2018.
- [9] E. M. Morales, *Gestión del conocimiento en sistemas "e-learning", basado en objetos de aprendizaje, cualitativa y pedagógicamente definidos*. Ediciones Universidad de Salamanca, 2010.
- [10] UNESCO, "Estándares de competencias en tic para profesores," Medellín, 2008.
- [11] S. F. M. Alfalah, "Perceptions toward adopting virtual reality as a teaching aid in information technology," *Educ. Inf. Technol.*, vol. 23, no. 6, pp. 2633–2653, Nov. 2018.
- [12] O. G. Sosa and C. H. Manzuoli, "Models for the pedagogical integration of information and communication technologies: a literature review," *Ens. Avaliação e Políticas Públicas em Educ.*, vol. 27, no. 102, pp. 129–156, Mar. 2019.
- [13] P. R. Albion, J. Tondeur, A. Forkosh, and J. Peeraer, "Teachers' professional development for ICT integration: Towards a reciprocal relationship between research and practice," *Educ. Inf. Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 655–673, Dec. 2015.
- [14] C. Núñez, J. Gaviria, S. Tobón, C. Guzmán, and R. Herrera, "La práctica profesor mediada por TIC: Una construcción de significados," *Rev. Espac.*, vol. 40, no. 16, pp. 1–16, 2019.
- [15] B. Balci and M. M. Inceoglu, "Reusable Learning Objects (RLOs) for Computer Science Students," in *Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006*, no. 10, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, pp. 373–382.
- [16] J. Echeverría, "¿Internet en la escuela o la escuela en Internet?," *Rev. Educ.*, no. 8, pp. 199–206, 2002.
- [17] O. Martínez, H. Combata, and E. De la Hoz, "Mediación de los Objetos Virtuales de Aprendizaje en el Desarrollo de Competencias Matemáticas en Estudiantes de Ingeniería," *Form. Univ.*, vol. 11, no. 6, pp. 63–74, Dec. 2018.
- [18] G. Afacan, "Achievement of joint perception in a computer supported collaborative learning environment: a case study," *Turkish Online J. Distance Educ.*, vol. 18, no. 13, pp. 78–90, 2017.
- [19] B. Bravo, M. J. Bouciguez, and M. Braunmüller, "Una propuesta didáctica diseñada para favorecer el aprendizaje de la Inducción Electromagnética básica y el desarrollo de competencias digitales," *Rev. Eureka sobre enseñanza y Divulg. las ciencias.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–14, 2018.
- [20] C. Redecker and Y. Punie, *European Framework for the Digital Competence of Educators: DigCompEdu*. 2017.
- [21] L. Caruso, "Digital innovation and the fourth industrial revolution: epochal social changes?," *Al Soc.*, vol. 33, no. 3, pp. 379–392, Aug. 2018.
- [22] E. I. Parra, O. L. Peñas, and A. M. Gómez, "Objetos virtuales para el aprendizaje autorregulado de estudiantes de terapia ocupacional," *Rev. Salud Pública*, vol. 19, no. 6, pp. 760–765, Nov. 2017.
- [23] A. C. Ventura, M. S. Cattoni, and A. Borgobello, "Aprendizaje autorregulado en el nivel universitario: Un estudio situado con estudiantes de psicopedagogía de diferentes ciclos académicos," *Rev. Electrónica Educ.*, vol. 21, no. 2, p. 1, Apr. 2017.
- [24] M. de R. Guerrero, *Metodologías Activas y Aprendizaje por Descubrimiento. Las TIC y la Educación - María de Rus Guerrero Sánchez - Google Libros*. 2014.
- [25] G. Tizón, *Las Tic en Educación - Germán A. Tizón Freiría - Google Libros*, Loulupress. 2008.
- [26] A. J. Iriarte and I. Sierra, *Estrategias metacognitivas en la resolución de problemas matemáticos by Libros Cymted - Maestría en Educación - issuu*. Monteria-Colombia: <https://issuu.com/librosisabel>, 2012.
- [27] D. Valverde, A. J. Pro, and J. González, "La competencia informacional-digital en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias en la educación secundaria obligatoria actual: una revisión teórica," *Rev. Eureka sobre enseñanza y Divulg. las ciencias.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–15, Jan. 2018.
- [28] A. F. G. Castel, "La integración de las TIC en los procesos educativos y organizativos," *Educ. em Rev.*, vol. 34, no. 69, pp. 325–339, Jun. 2018.
- [29] L. I. Rivera, K. Fernández, F. J. Guzmán, and J. Pulido, "La aceptación de las TIC por profesorado universitario: Conocimiento, actitud y practicidad," *Rev. Electrónica Educ.*, vol. 21, no. 3, p. 1, Aug. 2017.
- [30] J. Mupita, I. Widiaty, and A. G. Abdullah, "How important is technological, pedagogical, content knowledge? A literature reviews," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 434, p. 012285, Dec. 2018.
- [31] D. D. Agyei and J. M. Voogt, "Pre-service mathematics teachers' learning and teaching of activity-based lessons supported with spreadsheets," *Technol. Pedagog. Educ.*, vol. 25, no. 1, pp. 39–59, Jan. 2016.
- [32] O. I. Vaganova, T. E. Lebedeva, M. P. Prokhorova, Z. V. Smirnova, and A. A. Shkunova, "Pedagogical support of the information-educational environment of the university Apoyo pedagógico del entorno informativo-educativo de la universidad," *Rev. Espac.*, vol. 40, no. 6, pp. 1–6, 2019.
- [33] B. Lago, L. Colvin, and M. Cacheiro, "Estilos de Aprendizaje y Actividades Polifásicas: Modelo EAAP," *Rev. Estilos Aprendiz.*, vol. 2, no. 20, pp. 1–20, 2008.
- [34] P. Cabrera, "¿Cómo diseñar ayudantías que favorezcan el aprendizaje activo de los estudiantes tutorados?: La percepción del ayudante universitario," *Estud. pedagógicos*, vol. 43, no. 3, pp. 47–62, 2017.

- [35] R. Pacheco and E. Maldonado, "Relationship between learning styles and teaching theories [Relación entre los estilos de aprendizaje y las teorías de enseñanza]," *Retos*, vol. 32, no. 7, pp. 7–13, 2017.
- [36] P. C. Cantú and J. M. Rojas, "Estilos de aprendizaje: La experiencia de la Escuela Preparatoria Técnica Médica en la Universidad Autónoma de Nuevo León, México," *Rev. Electrónica Educ.*, vol. 22, no. 2, p. 1, Jan. 2018.
- [37] M. T. Colén, B. Jarauta, and L. C. Castro, "El aprendizaje reflexivo en la formación inicial de maestros/as: de la experiencia a la integración y síntesis de los contenidos," *Rev. Complut. Educ.*, vol. 27, no. 1, pp. 1130–2496, Jan. 2016.
- [38] M. Gerardo, "La Norma UNE 166006:2006 Vigilancia Tecnológica," 2008.
- [39] T. Listiawan, Purwanto, A. R. As'ari, and M. Muksar, "Mathematics Teachers Technological Content Knowledge (TCK) in using Dynamic Geometry Software," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1114, no. 1, p. 012121, Nov. 2018.
- [40] K. Ruthven, S. Hennessy, and R. Deaney, "Constructions of dynamic geometry: A study of the interpretative flexibility of educational software in classroom practice," *Comput. Educ.*, vol. 51, no. 1, pp. 297–317, Aug. 2008.
- [41] S. J. Moreno J. and J. J. García, "MODELO TECNO-PEDAGÓGICO EN EL AULA DE TRIGONOMETRÍA," *Clame - Acta Lat. América Matemáticas Educ. RELME31*, vol. 31 Numero, no. 9, pp. 1843–1851, 2018.

Análisis del comportamiento a largo plazo de un puente viga cajón construido por voladizos sucesivos en Colombia a partir de deflexiones medidas en campo

Luis F. Rincón P.¹

Álvaro Viviecas J.²

Gustavo Chio C.³

Edison Osorio B.⁴

Carlos A. Riveros J.⁵

¹⁻³ Universidad Industrial de Santander

⁴ Universidad Antonio Nariño

⁵ Universidad de Antioquia
Colombia

El uso de puentes viga cajón construidos por voladizos sucesivos se ha extendido de manera masiva debido al alcance de grandes luces en zonas montañosas sin necesidad de apoyos intermedios. No obstante, se han evidenciado deflexiones excesivas en puentes a nivel internacional con más de 10 años de construcción, como resultado de modelos normativos anteriores que subestimaron los efectos reológicos. Para garantizar la vida útil de un puente por más de 100 años es necesario contar con un sistema de monitoreo periódico que valide su estado de servicio. En Colombia no existen estudios sobre el comportamiento a largo plazo de esta tipología de puentes, la cual es usada principalmente para abarcar luces entre 80 y 250 metros de longitud, por lo tanto, este estudio busca establecer un proceso para la estimación de efectos diferidos en puentes viga cajón en Colombia de los que se tiene poca información de su construcción. Por consiguiente, se realiza la medición de altimetría de un puente existente y se calculan los efectos reológicos de la estructura mediante un modelo de elementos finitos que considera las etapas constructivas y efectos geológicos. Finalmente, se realiza un análisis comparativo de los resultados y se establecen recomendaciones para su monitoreo permanente que garanticen el estado de servicio de la estructura.

1. INTRODUCCIÓN

Los puentes viga cajón en concreto presforzado construidos por voladizos sucesivos representan una solución económicamente viable, debido al alcance de grandes luces y sus beneficios en zonas montañosas sin la necesidad del uso de apoyos intermedios [1]. La primera aparición de estas estructuras se dio en Brasil en 1931, pero su uso aumento a partir de los años 70 gracias a su implementación masiva en Europa [2], [3]. El método constructivo consiste en la realización simétrica de nuevas secciones del puente mediante el uso de formaleta en voladizo denominada "carro de avance", la cual esta soportada en la sección previamente fundida. Una vez se alcanza la mitad de la luz, se construye una sección de cierre finalizando la estructura, como se ve en la Figura 1. Para compensar las deflexiones generadas por voladizo durante su construcción, las secciones son fundidas con una contra flecha de acuerdo con las especificaciones de diseño [4], pero la falta de control durante la construcción, desconocimiento del material y variaciones ante los fenómenos climatológicos puede ocasionar esfuerzos no previstos en la estructura.



Figura 1. Procedimiento constructivo de un puente viga cajón construido por voladizos sucesivos *in situ*

El trabajo de la ingeniería de puentes se puede dividir entre la construcción de nuevos proyectos y el mantenimiento de puentes existentes para garantizar su uso [5]. Este último es importante debido a que estas estructuras, principalmente hechas en concreto y que representan una gran inversión económica, están expuestas a condiciones ambientales de variada intensidad que modifican su comportamiento mecánico, junto con otros factores de deterioro como la falta de mantenimiento, el aumento de los volúmenes de tráfico y niveles de carga de los vehículos pueden ocasionar la pérdida de capacidad de servicio afectando la seguridad durante su vida útil [6].

¹ luisrinconprada@hotmail.com

² alvivija@uis.edu.co

³ gchioch@uis.edu.co

⁴ e.osorio@uan.edu.co

⁵ carlos.riveros@udea.edu.co

Estimar las deformaciones a largo plazo en el concreto se ha convertido en un problema asociado principalmente a inconsistencias en la determinación de su comportamiento por fenómenos como el Flujo Plástico (Creep) o la Retracción por fraguado (Shrinkage) [7], [8]. En general se puede afirmar que las deformaciones debidas al Creep son producto de la aplicación de cargas sostenidas durante periodos largos y el Shrinkage de la reducción del volumen de agua en el concreto, debidos a los cambios de temperatura que producen agrietamiento [9]. El monitoreo de puentes viga cajón ha llegado a estimar aumento en las deflexiones por más de 30 años debido a los largos periodos de reacción de estos fenómenos y se considera que no ha sido suficientemente estudiado [4], [10]–[12], como se ve en la Figura 2. Este exceso de deformaciones a largo plazo no esperadas pueden ocasionar agrietamiento del concreto, redistribución de esfuerzos, aumento de la corrosión y daños en la capa asfáltica [7], [13], [14].



Figura 2. Efectos a largo plazo evidenciados en el puente Parrots después de 12 años [15]

Para la estimación de estos fenómenos se han compilado diversas bases de datos de laboratorio como los utilizados por Bazant y Li [11], o la RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures), a partir de las cuales se han formulado modelos empíricos como el Model Code en 1990 [16], después denominado modelo CEB-FIP-MC actualizado en 1999 y 2010 [17], [18], el modelo 209R-92 descrito en la ACI [19], el modelo GL2000 [20] y recientemente los modelos propuesto por Bazant denominados B3 y B4 [21]–[24]. Dichos modelos han permitido una aproximación al fenómeno de Creep y Shrinkage, además, son la base de los criterios normativos actuales a nivel mundial. No obstante, la duración de la medición de Creep en estas bases de datos varía desde días hasta algunos años, por lo tanto, han resultado inadecuados y poco realistas, sobre todo para largos periodos de tiempo [7], [25]. Por lo anterior, no es sorprendente que el progreso en el modelado matemático haya tomado a varias generaciones de investigadores y aún esté incompleto [22].

La literatura científica evidencia la aparición de deflexiones excesivas en una gran cantidad de puentes como la desarrollada por el National Swedish Road Board en 1970, donde se estudiaron los puentes Tunsta, Stenungsun, Anlo y Kallosund durante 15 años, determinando una influencia dominante del Creep para los primeros años de vida de estas estructuras [26]. Investigaciones como la de Peter Takács [27], reduce la incertidumbre de estos fenómenos para concretos de agregados livianos mediante simulaciones de Monte Carlo aplicados a los puentes Stolma, Stovset y Norddalsfjord. En la Tabla 1, se presentan la longitud de luz principal y deflexiones observadas en algunos puentes de esta tipología, entre estos se encuentra el caso más importante que evidenció la gravedad del fenómeno de deflexiones excesivas, registrado en el puente de Koror-Babeldaob (Palau), que tuvo el récord mundial de 241 m, del cual se esperaba una deflexión final de 0.71 a 0.737m, pero alcanzó un valor de 1.61m a los 18 años de su apertura y colapsó producto de un presfuerzo correctivo cuya implementación demoró más de lo estimado [28]–[30].

Tabla 1. Algunos puentes viga cajón construidos por voladizos sucesivos fundidos *in situ* que presentan deflexiones excesivas

Nombre	Longitud luz principal (m)	Deflexiones (mm)
Tunsta bridge	106.5	110
Stenungsun bridge	94	80
Anlo bridge	134	110
Kallosund bridge	107	80
Stovset bridge	220	200
Stolma bridge	301	92
Humen I bridge	220	223
Parrots bridge	195	635
Koror-Babeldaob bridge	241	1610
Huangshi Yangtze River Bridge	245	320

Nota: Adaptado de [7], [26], [27], [30]–[32]

Para mejorar las propiedades mecánicas perdidas del puente por la aparición de deflexiones excesivas, generalmente se usa presforzado externo para prevenir la aparición de nuevas grietas y su deformación [33], el cual se puede

realizar por dentro o fuera del cajón de la estructura, como se observa en la Figura 3. Sin embargo, otros métodos se han implementado como el uso de platinas adheridas, fibras de carbono y adición de armaduras metálicas en centro de luz [15].



Figura 3. Postensado correctivo externo e interno aplicado en puentes viga cajón con problemas de deflexión excesiva [33], [34]

La medición de deflexiones en puentes viga cajón es un procedimiento fundamental para establecer el estado de la estructura y predicciones sobre su comportamiento futuro, para ello se han desarrollado distintas metodologías, las cuales se pueden dividir en mediciones directas e indirectas. Las mediciones indirectas calculan las deflexiones a partir de información de deformaciones obtenidas por galgas dentro del concreto, como las utilizadas en el viaducto de North Halawa Valley [35], donde hacen uso de más de 200 instrumentos de medición para el análisis de la prueba de carga y su monitoreo durante ocho años. Recientemente, se ha hecho uso de acelerómetros con pruebas de vibración forzada para identificar flexibilidad estructural y estimar deflexiones apoyándose en galgas de gran longitud [36].

Por otro lado, las mediciones directas se caracterizan por el uso de altimetría para establecer la deflexión de la estructura y para ello su muestreo se realiza de manera periódica. Distintas investigaciones han implementado el uso de instrumentos como LDV (Laser Doppler Vibrometer), fotogrametría, radares de microondas, niveles hidrostáticos, entre otros. Sin embargo, el método más utilizado es la toma de niveles con instrumentos topográficos, como los utilizados por Peter Takacs en los puentes Norddalsfjord, Stovset y Stolma en Noruega, ya que proporcionan una precisión adecuada y son fáciles de replicar [27], [37].

Teniendo en cuenta el auge de esta tipología para la construcción de puentes de grandes luces en Colombia, este artículo pretende incentivar el estudio de deflexiones a largo plazo en las estructuras del país, para lo cual se realizará un análisis comparativo de deflexiones medidas en un puente construido en el departamento de Santander y su correspondiente modelo numérico realizado en el software MIDAS CIVIL [38], que considere los efectos a largo plazo a partir de la información obtenida de los planos de construcción. A partir de esto, se define el estado actual de la estructura y se establecen recomendaciones para un seguimiento periódico de la estructura con miras a establecer una línea base para el monitoreo a lo largo de la vida útil de la estructura.

2. DESCRIPCION DEL PUENTE

La construcción de la represa hidroeléctrica de Hidrosogamoso desarrollada por ISAGEN conllevó a la realización de vías sustitutas para las zonas de influencia del proyecto en las que se encontraba la región de San Vicente de Chucurí con 25 km de vía nueva [39], como se observa en la Figura 4, la cual tiene gran relevancia en la economía del país por ser productora del 25% del cacao colombiano [40].

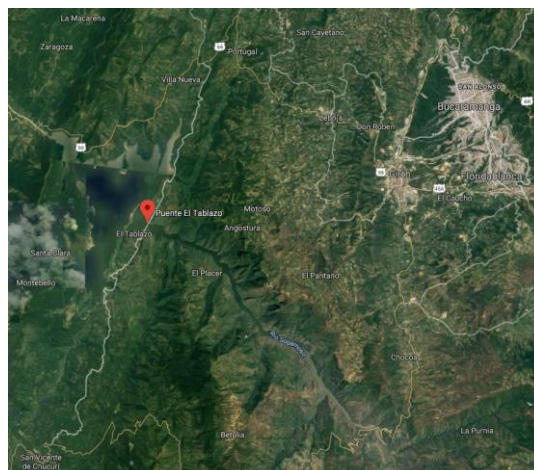


Figura 4. Localización del puente el Tablazo

En esta nueva vía se construyeron seis puentes, de los cuales el Ramo, Pujámenes y el Tablazo son de la tipología viga cajón en voladizos sucesivos in situ, con luces de 90, 122 y 186m respectivamente. El puente el Tablazo es actualmente el segundo con mayor luz central en Colombia (Figura 5), su construcción finalizó en el 2013 consumiendo más de 22.000 m³ de concreto, incluyendo cimentación y fue diseñado con el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCP 200-94 [41]) y los criterios normativos AASHTO 2012 [42].



Figura 5. Puente el Tablazo

El puente está compuesto por dos luces centrales de 186m y dos luces laterales de 93m para una longitud total de 558m, una pendiente longitudinal de 0.4%, un ancho de tablero de 10.55 metros con dos carriles para vehículos y una zona de circulación para peatones. Como se observa en la Figura 6, la altura del cajón varía de 9 metros en la zona de la pila a tres metros en el centro de luz, el grosor de las paredes del cajón varía de 0.6m en la base a 0.4m en el centro de luz y las dovelas del puente tienen una longitud entre 3.75 y 5m de longitud. La estructura está soportada por tres pilas rectangulares con alturas de 90, 109 y 57m de altura que se apoyan en dados de concreto, como se observa en la Figura 7, y pilotes de longitudes entre 25 y 37 metros.

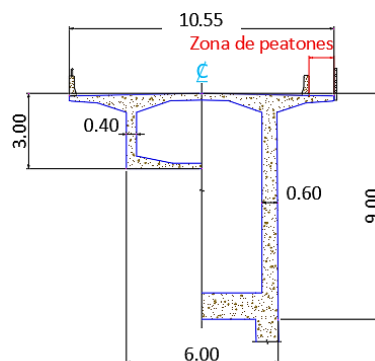


Figura 6. Sección transversal del cajón en el centro de luz y los apoyos del puente el Tablazo

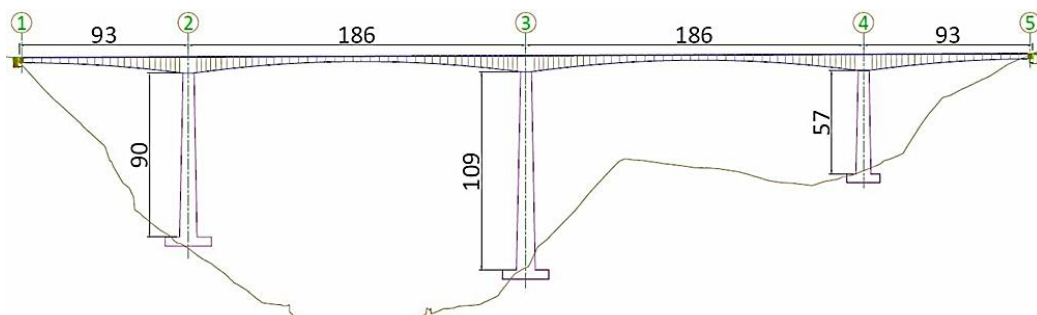


Figura 7. Sección longitudinal del puente el Tablazo

Se utilizaron en total 218 grupos de tendones (ASTM A416 [43]) donde 170 están conformados por 19 torones de 5/8" con tensionamiento de 389.5 toneladas por cable, se utilizan para presfuerzo de la losa superior y diámetro de ducto de 0.11m. El resto de los grupos están conformado por 12 torones de 5/8" con tensionamiento de 246 toneladas por cable en la losa inferior y ductos de 0.08 m de diámetro interno, como se observa en la Figura 8. Todos los cables poseen una resistencia a la tracción última de 1860 MPa, son considerados de baja relajación con una penetración de cuña de 0.007m y debido a la geometría casi recta de los tendones no se consideran pérdidas de presfuerzo por curvatura y para el tensionamiento se tiene en cuenta el proceso constructivo mencionado.

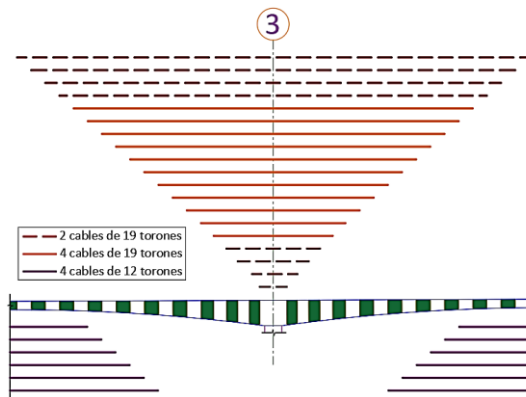


Figura 1. Distribución de cables de preesforzados sobre la pila del eje 3

2.1 Mediciones

Para la medición de deflexiones del puente el Tablazo se utiliza un nivel digital con precisión mínima de 0.7mm y distancia de lectura de 100m (Figura 9). Después de realizar una inspección inicial se determinó realizar mediciones sobre el concreto expuesto del tablero de la estructura ubicado en el carril peatonal, como se muestra en las Figuras 6 y 9, con el objetivo de disminuir las posibles variaciones del asfalto de los demás carriles.



Figura 2. Procedimiento de medición del puente el Tablazo

Debido a los acabados irregulares de la unión entre dovelas se estableció realizar mediciones en el centro longitudinal de cada dovela y en los puntos demarcados usados para las pruebas de carga. La distancia horizontal entre distintos puntos de medición varía entre 3.87 y 10 metros debido a que se tomaron mediciones cada dos dovelas de acuerdo con los planos de diseño.

2.2 Modelo numérico

Se realiza el análisis en el programa MIDAS CIVIL, donde se plantea un modelo de elementos finitos como se muestra en la Figura 10. Para este modelado se tiene en cuenta los factores ambientales de humedad mediante el uso de registro de datos de una estación meteorológica local. Las propiedades geométricas y materiales son tomadas a partir de los planos de construcción, donde se tiene un concreto con propiedades de acuerdo a la norma ASTM C5000 de 35 MPa para el tablero y C4000 de 28 MPa para las pilas. El tensionamiento se realiza cuando el concreto alcanza una resistencia mínima de 28 MPa y los apoyos en los extremos del puente se modelaron de acuerdo a las propiedades del neopreno especificadas en planos.

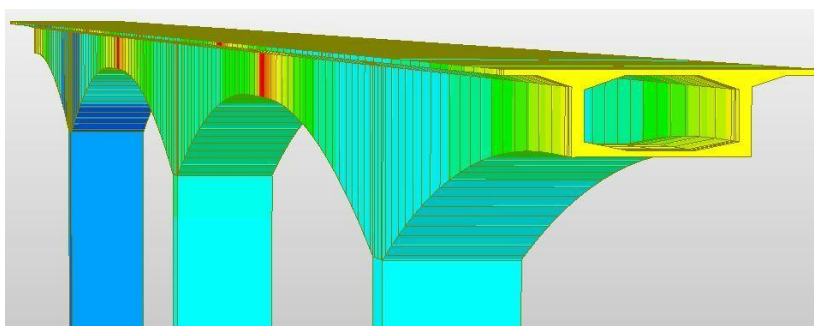


Figura 3. Modelo de elementos finitos del puente el Tablazo realizado en MIDAS CIVIL

Las etapas constructivas son modeladas de acuerdo con las recomendaciones de los planos y registros de la construcción, donde se considera primero la construcción de los voladizos del eje 4, una vez terminada esta etapa se continua con el eje 3 y 2 respectivamente. La construcción de cada dovela tiene una duración entre 7 y 15 días, se contemplan las cargas del carro de avance de 588 kN aproximadamente, el concreto húmedo, el tensionamiento de los cables de presforzado, el avance de la formaleta y el peso propio del material. Una vez finalizada la superestructura, se instala la baranda peatonal, los parapetos y la carpeta asfáltica.

Los efectos a largo plazo de Creep y Shrinkage se tienen en cuenta mediante la implementación del modelo AASHTO, según lo indicado en planos de diseño y la variación del comportamiento a compresión del concreto con el modelo CEB-FIP 2010. Se calculan proporción de humedad que puede moverse a través de la sección transversal a partir del área y perímetro de los elementos, de acuerdo con el código CEB-FIP 1990.

3. ANÁLISIS RESULTADOS

En la figura 11 se observan las cotas durante la construcción, las cotas al finalizar su vida útil de acuerdo a los planos de diseño y las mediciones realizadas en campo. Se observa que la altura del puente el tablero en centro de luz entre ejes 3 y 4 se encuentra 0.10m por debajo de su valor esperado según diseño.

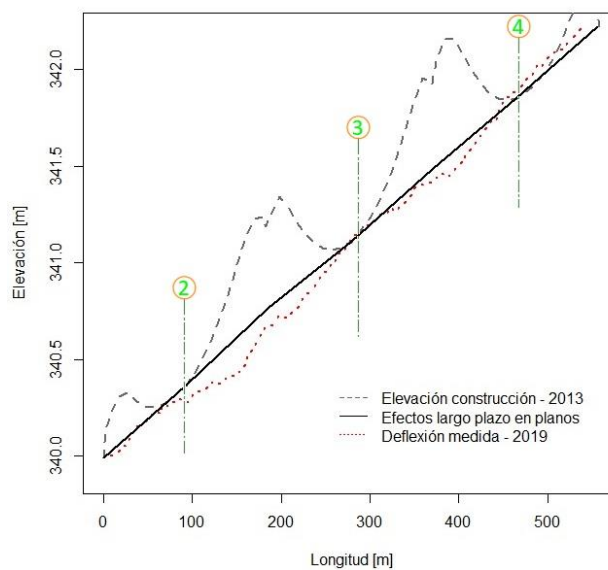


Figura 4. Desplazamiento vertical del puente el Tablazo medido en marzo de 2019

Para determinar los efectos a largo plazo de análisis numérico, se tuvo en cuenta una etapa constructiva final, esta tiene una duración de aproximadamente 100 años para establecer el estado del puente al concluir su vida útil. En la Figura 12 se comparan la elevación de los voladizos del eje 3 en el tablero durante la construcción en el año 2013, con los efectos a largo plazo esperados según planos para un tiempo infinito, también se observan las mediciones realizadas después de seis años de finalizada su construcción y el modelo planteado para la investigación.

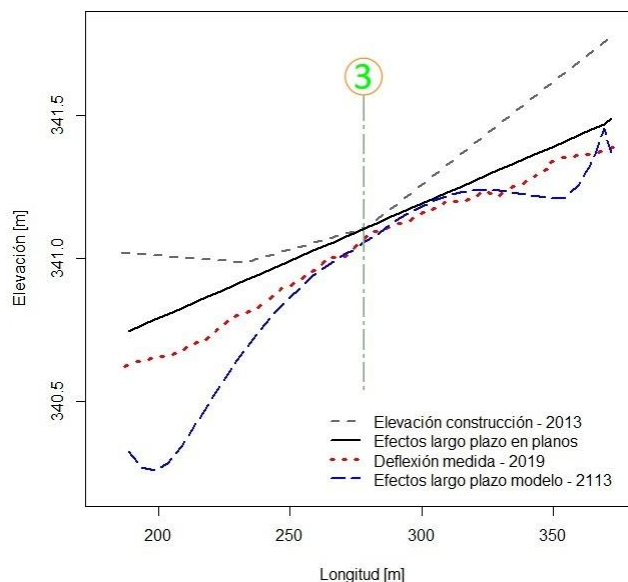


Figura 5. Desplazamiento vertical del tablero del puente en la pila del eje 3

Adicional a esto, se logra evidenciar que la estructura fue concebida con una contra flecha de acuerdo con lo especificado por diseño y criterios normativos [41], [42], y las deflexiones esperadas a lo largo de su vida útil consideran la pérdida de la curvatura de construcción. Sin embargo, después de 6 años de su puesta en funcionamiento, la estructura presenta deflexiones de aproximadamente 0.12m más que las esperadas al final de una vida útil (100 años). Por otra parte, el modelo predice el aumento de estas deflexiones hasta un máximo 0.42m al finalizar el tiempo de servicio, lo cual quiere decir que las medidas tomadas en el diseño para contrarrestar las deflexiones a largo plazo a través del uso de contra flechas no funcionaron adecuadamente.

4. CONCLUSIONES

Las deflexiones a largo plazo medidas en el puente el Tablazo exceden a las esperadas por diseño a la luz de la normativa AASHTO 2012, lo cual, es un indicativo de la importancia del monitoreo en este tipo de estructuras por sus antecedentes en la literatura científica respecto a las deflexiones excesivas.

Frente a este panorama, se sugiere realizar una revisión de los esfuerzos presentes en la estructura para verificar que se encuentren dentro de los límites normativos. Pero, lo más importante es ajustar el procedimiento realizando una calibración del modelo a partir de mediciones tomadas, con intervalos de seis meses como línea base para el monitoreo de las deflexiones en la estructura a lo largo de la vida de servicio.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el proyecto “Estudio de deformaciones a largo plazo de puentes viga-cajón construidos por voladizos sucesivos en Colombia” de la Universidad Industrial de Santander a través de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (Proyecto No. 2437 de 2018). Agradecemos a la Gobernación de Santander por proporcionar la información necesaria para esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. Manterola, Puentes II. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2006.
- [2] C. Fernandez Casado, J. Manterola Armisen, and L. Fernandez Troyano, “Construcción de puentes por voladizos sucesivos mediante dovelas prefabricadas,” *Revista de obras públicas*, vol. 117, pp. 715–730, 1970.
- [3] M. G. Perdomo, “Estudio Comparativo De Puentes Construidos Por Voladizos Sucesivos,” M.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [4] R. Malm and H. Sundquist, “Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges,” *Engineering Structures*, vol. 32, no. 4, pp. 1038–1045, 2010.
- [5] J. Santos, C. Nunes, C. Fernandes, and H. Varum, “Common pathologies in RC bridge structures: A statistical analysis,” *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 7, pp. 19–26, 2007.
- [6] W. Radomski, *Bridge Rehabilitation*. Singapore: Imperial College Press, 2002.
- [7] T. Tong, Z. Liu, J. Zhang, and Q. Yu, “Long-term performance of prestressed concrete bridges under the intertwined effects of concrete damage, static creep and traffic-induced cyclic creep,” *Engineering Structures*, vol. 127, pp. 510–524, 2016.
- [8] T. Guo, Z. Chen, T. Liu, and D. Han, “Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses,” *Engineering Structures*, vol. 117, pp. 358–371, 2016.
- [9] Z. Yazdizadeh, H. Marzouk, and M. A. Hadianfard, “Monitoring of concrete shrinkage and creep using Fiber Bragg Grating sensors,” *Construction and Building Materials*, vol. 137, pp. 505–512, 2017.
- [10] V. Kristek, Z. P. Bazant, M. Zich, and A. Kohoutkova, “Box Girder Bridge Deflections,” *ACI Concrete International*, vol. 28, no. 1, pp. 55–63, 2006.
- [11] L. Su, Y. Wang, S. Mei, and P. Li, “Experimental investigation on the fundamental behavior of concrete creep,” *Construction and Building Materials*, vol. 152, November, pp. 250–258, 2017.
- [12] I. H. Woolson, “Some remarkable tests indicating flow of concrete under pressure,” *Engineering News*, vol. 54, no. 18, pp. 459–460, 1905.
- [13] N. J. Gardner and J. W. Zhao, “Creep and shrinkage revisited,” *ACI Materials Journal*, vol. 90, no. 3, pp. 236–246, 1993.
- [14] Z. P. Bažant, “Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 203, no. 1, pp. 27–38, 2001.
- [15] D. Chen, Y. Yang, and P. Liu, “Analysis of Deflection Problems of Large-span Continuous Rigid Frame Bridge and Prevention Measures,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 22, 2015.
- [16] MC 90, *CEB-FIP model code 1990*, 6th ed. London: Thomas Telford, 1993.
- [17] J. C. Walraven and A. Bigaj-van Vliet, “The 2010 fib Model Code for Structural Concrete: a new approach to structural engineering,” *Structural Concrete*, vol. 12, no. 3, pp. 139–147, 2011.
- [18] F. internationale du béton., *Model code 2010: final draft*, 1st ed., Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib), 2012.
- [19] ACI Committee 209, *209.1R-05: Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete*, American Concrete Institute, 2005.
- [20] N. J. Gardner and M. J. Lockman, “Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal Strength Concrete,” *ACI Materials Journal*, vol. 98, pp. 159–167, Mar. 2001.
- [21] R. Wendner, M. H. Hubler, and Z. P. Bažant, “Model B4: Multi-decade creep and shrinkage prediction of traditional and modern concretes,” In Proc. Computational Modelling of Concrete Structures - EURO-C 2014, 2014, vol. 2, pp. 679–684.
- [22] R. Wendner, M. H. Hubler, and Z. P. Bažant, “Statistical justification of model B4 for multi-decade concrete creep using laboratory and bridge databases and comparisons to other models,” *Materials and Struc.*, vol. 48, no. 4, pp. 815–833, 2015.

- [23] Z. P. Bazant and S. Baweja, "Justification and refinements of model B3 for concrete creep and shrinkage 2. Updating and theoretical basis," *Materials and Structures*, vol. 28, no. 8, pp. 488–495, 1995.
- [24] Z. P. Bažant and S. Baweja, "Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3," *Materials and Structures*, vol. 28, no. 6, pp. 357–365, 1995.
- [25] Q. Yu, Z. P. Bažant, and R. Wendner, "Improved algorithm for efficient and realistic creep analysis of large creep-sensitive concrete structures," *ACI Structural Journal*, vol. 109, no. 5, pp. 665–675, 2012.
- [26] U. Keijer, "Long-term deflections of cantilever prestressed concrete bridges," In Proc. IABSE Symposium (Madrid): Design of concrete structures for creep, shrinkage and temperature changes, 1970, p. 27-34.
- [27] P. F. Takács, "Deformations in Concrete Cantilever Bridges: Observations and Theoretical Modelling," Ph.D. dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2002.
- [28] B. McDonald, V. Saraf, and B. Ross, "A spectacular collapse: Koror-Babeldaob (Palau) balanced cantilever prestressed, post-tensioned bridge," *Indian Concrete Journal*, vol. 77, no. 3, pp. 955–962, 2003.
- [29] Z. P. Bazant, Q. Yu, G-H. Li, G. J. Klein, and V. Kristek, "Excessive Deflections of Record-Span Prestressed Box Girder," *Concrete International*, vol. 32, no. 06, pp. 44–52, 2010.
- [30] Z. P. Bažant, Q. Yu, and G-H. Li, "Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigms," *Journal of Structural Engineering*, vol. 138, no. 6, pp. 676–686, 2012.
- [31] J. Xie, G. Wang, and X-H. Zheng, "Review of Study of Long-term Deflection for Long Span Prestressed Concrete Box-girder Bridge," *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, vol. 2, no. 2, pp. 47–51, Dec. 2007.
- [32] Z. Pan, C. C. Fu, and Y. Jiang, "Uncertainty Analysis of Creep and Shrinkage Effects in Long-Span Continuous Rigid Frame of Sutong Bridge," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 248–258, 2011.
- [33] O. Burdet and M. Badoux, "Deflection Monitoring of Prestressed Concrete Bridges Retrofitted by External Retrofitting by external post-tensioning," In Proc. IABSE Symposium (Rio Janeiro), 1999, vol. 83, pp. 396–403.
- [34] V. Křístek, L. Vráblik, and V. Hrdoušek, "Causes of long-term deflections of large-span pre-stressed concrete box girders and recommendations on how to avoid these," *Transactions on Transport Sciences*, vol. 1, no. 3, pp. 97–102, 2017.
- [35] I. N. Robertson, "Prediction of vertical deflections for a long-span prestressed concrete bridge structure," *Engineering Structures*, vol. 27, no. 12, Oct., pp. 1820–1827, 2005.
- [36] Y. Tian, J. Zhang, Q. Xia, and P. Li, "Flexibility identification and deflection prediction of a three-span concrete box girder bridge using impacting test data," *Engineering Structures*, vol. 146, pp. 158–169, 2017.
- [37] A. Akl, M. Saiid Saiidi, and A. Vosooghi, "Deflection of in-span hinges in prestressed concrete box girder bridges during construction," *Engineering Structures*, vol. 131, Jan., pp. 293–310 2017.
- [38] *MIDAS CIVIL Software*. Seongnam, South Korea: MIDAS Information Technology Co., 2019.
- [39] Velosa, M, "Este es el estado de las obras sustitutivas en la vía a Barrancabermeja," *Vanguardia Liberal*, 2013, [Online], Available: <https://bit.ly/2E4b1LF>. [Accessed: 20-apr-2019].
- [40] D. León Duran, "Tras casi un siglo, hay nueva vía de Bucaramanga a San Vicente," *Vanguardia Liberal*, 2014, [Online], Available: <http://bit.ly/2W8SIRR>. [Accessed: 20-apr-2019].
- [41] Ministerio de transporte, *Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes CCP200-94*. Bogota, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1995.
- [42] American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [43] ASTM, *Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete*. West Conshohocken, USA: American Society of Testing Materials, 2006.

Comportamiento sísmico de muros delgados de concreto reforzado en zona de amenaza sísmica alta

Érica L. Arango P.¹

William Valencia M.²

Álvaro Viviescas J.³

Oscar J. Begambre C.⁴

Gustavo A. Ospina I.⁵

^{1,3,4} Universidad Industrial de Santander

² Universidad del Quindío

⁵ Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

La construcción de edificaciones en altura con el sistema industrializado de muros delgados de concreto reforzado se ha extendido masivamente en los países latinoamericanos como respuesta a la elevada demanda de vivienda y a las exigencias de preservación de recursos. No obstante, su desempeño sísmico durante los sismos de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011) evidenciaron fallas que no se tenían previstas, como pandeo fuera del plano, aplastamiento de la zona extrema a compresión por ausencia de refuerzo transversal adecuado y falta de distribución de la plastificación en altura del muro, atribuidas principalmente a los bajos espesores de los mismos, entre otras causas. Como consecuencia de esto, se cuestiona sobre el desempeño sísmico que puedan tener los muros usados en Colombia frente un sismo fuerte, debido a que estos tienen espesores menores (15 - 20 cm) a los muros que sufrieron daño en Chile (20 - 30 cm) y Nueva Zelanda (20 - 40 cm). El presente trabajo está orientado a la selección, ajuste y validación de un modelo no lineal entre los más usados en la literatura científica reciente para evaluar el comportamiento sísmico de muros de concreto reforzado característicos de la ciudad de Bucaramanga (Colombia), así como la comparación de este con modelos de pandeo inelástico fuera del plano, obtenidos o validados a partir de campañas experimentales disponibles en la literatura científica, además de la respectiva identificación de los parámetros más influyentes en términos de la respuesta estructural de este sistema estructural.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de muros estructurales para la construcción de edificaciones de gran altura se ha incrementado en los últimos años en muchos países, especialmente en Suramérica [1]. Por otro lado, en los últimos sismos representativos como el de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011) se observaron algunas deficiencias en el desempeño sísmico de este tipo de elementos estructurales. Una de las causas encontradas en los edificios que sufrieron daño son los bajos espesores de los muros [2], [3], factor que está directamente relacionado con la ductilidad, pues entre menor sea el espesor, menor es la zona de confinamiento y los muros son más susceptibles a presentar fallas. En Colombia los espesores son menores que los usados en Chile y Nueva Zelanda [4], debido a la ausencia de restricciones normativas en la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR 2010) y algunas ciudades como Bucaramanga ha adoptado masivamente la construcción en altura de muros delgados debido a la escasez de terreno (como se muestra en la Figura 1), aumentando el riesgo frente a un sismo, dado que la ciudad se encuentra ubicada en una zona de amenaza sísmica alta.



Figura 1. Edificaciones en muros de concreto reforzado, ciudad de Bucaramanga
Fuente: Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción INME-UIS

¹ ericaarango@gmail.com

² wvalencia@uniquindio.edu.co

³ alvivija@uis.edu.co

⁴ ojbegam@uis.edu.co

⁵ gustavo.ospina@upb.edu.co

Frente a la deficiencia del sistema estructural, evidenciada en los últimos eventos sísmicos arriba mencionados, se han realizado diversos avances investigativos, uno de ellos en el modelado numérico de muros estructurales enfocado en desarrollar un modelo analítico que permita articular sus principales modos de falla, entre estos modelos se encuentran: macro modelos como analogía de columna ancha [5]–[9]; Sección de fibra, que representa el comportamiento inelástico en elementos de concreto reforzado fraccionándolo en capas de fibras transversales y paralelas [10]–[15]; Puntal – tensor, que asume el muro como una armadura estáticamente determinada, discretizado en paneles rectangulares [12], [9], [16], [17] y finalmente, el modelo de múltiples resortes, consistente en un número de resortes conectados en serie a elementos rígidos, con propiedades inelásticas de acuerdo con la longitud del elemento y el nivel de carga axial [18], [19]. En este último grupo los más representativos son: el MVLEM [20] que describe la respuesta a cortante tanto a nivel global como local, incorporando la respuesta a flexión (desacoplada) y el SFI_MVLEM, que acopla las respuestas de cortante y flexión [21]–[24]. Además de los micro modelos, para representar el comportamiento a flexión biaxial, subdividiendo el elemento en un número finito de pequeños elementos, interconectados en un número finito de puntos nodales [24], [25], pero en algunos casos no se recomienda su implementación para muros estructurales, debido a la complejidad de su formulación y a los grandes requerimientos computacionales [24].

No obstante, estos modelos de la bibliografía científica no son lo suficientemente fiables a la hora incorporar todos los modos de falla de los muros estructurales [27]. A esto se suma que uno de los daños recurrentes observados en los sismos de Chile y Nueva Zelanda corresponden a pandeo inelástico fuera del plano [2] (como se muestra en la Figura 2), la cual no ha sido tenido en cuenta para la formulación de los modelos mencionados.



Figura 2. Fallas fuera del plano - A) sismo Chile, B) Sismo nueva Zelanda

Sin embargo, este fenómeno sí ha sido estudiado de manera independiente a la formulación de los modelos que representan los principales mecanismos de daño en el plano de muros estructurales. Los primeros avances realizados sobre el pandeo inelástico de muros de concreto reforzado fueron dirigidos por Paulay y Goudsir [28], quienes especifican que el pandeo se basa en demandas plásticas de los extremos de los muros [30]. Ante la acción de cargas elevadas las barras de refuerzo experimentan deformaciones plásticas por tracción y el extremo confinado empieza a agrietarse; en la descarga ya hay una deformación plástica acumulada en las barras y las grietas permanecen abiertas [31]. Por lo que se resalta la importancia del acero de refuerzo, si el caso es de un muro con doble capa de refuerzo, en el momento del nuevo ciclo de tracción la segunda capa de refuerzo longitudinal (que aún no ha cedido en compresión) es la principal fuente de rigidez fuera del plano; pero en muros con una sola capa de refuerzo tal restricción no existe, lo que lleva a una rigidez fuera del plano mucho más baja y a desplazamientos más grandes [31].

Por lo anterior, Paulay y Priestley [32] asumen la deformación inelástica máxima a tracción en los extremos del muro como parámetro de la probabilidad de ocurrencia de pandeo, con dos componentes fundamentales: primero, un criterio de estabilidad asumiendo una zona de compresión bidireccional (ecuación 1); y segundo, un modelo de excentricidad de deformación que relaciona la deformación residual del acero longitudinal (ecuación 2), con una relación de excentricidad, calculada como desplazamiento fuera del plano dividido por el espesor del muro [34] como se muestra en la Figura 3. A partir de estas dos primeras ecuaciones se han desarrollado los modelos fenomenológicos conocidos hasta el momento la ecuación (1) se mantiene igual y autores como Chai y Elayer [34], Parra y Mohele [35] y Haro [29] desarrollaron una variación de la ecuación (2) para el modelo de excentricidad de deformación que relaciona la deformación residual del acero longitudinal, como se muestra en las ecuaciones (3), (4) y (5) respectivamente.

$$\xi_{cr} = 0,5 \left(1 + 2,35 m - \sqrt{5,53 m^2 + 4,70m} \right) \leq 0,5 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{sm} = 8\beta(b/l_0)^2 \xi \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sm} = \pi^2 \beta (b/l_0)^2 \xi + 3\varepsilon_y \quad (3)$$

$$\varepsilon_{sm} = k\pi^2 * (b/l_0)^2 \xi + 0.005 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{sm} = 8/3 * (b/l_0)^2 \xi + [-2.4 + 160 * (b/l_0)^2 - 1.9 * \ln(\rho_{lbe})] \quad (5)$$

Donde, ξ_{cr} es la relación de excentricidad máxima, ϵ_{sm} es la deformación residual del acero longitudinal. ξ es la relación de excentricidad, m es la relación de refuerzo mecánico, calculada como $(\rho_l f_y)/f'_c$, ρ_l es la relación de acero longitudinal, f_y es la resistencia a la fluencia del acero, f'_c es la resistencia a la compresión del concreto, βb es la distancia desde el lado interior del muro hasta el refuerzo longitudinal extremo, l_0 es la altura de la región pandeada, ϵ_y es la deformación del refuerzo longitudinal y ρ_{lbe} es la cuantía de acero longitudinal.

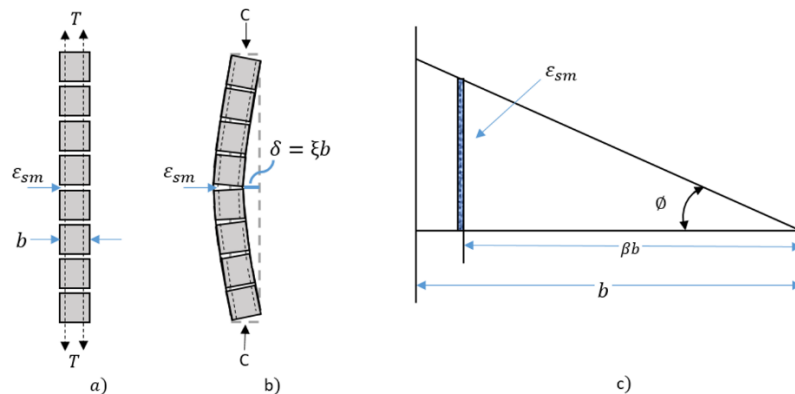


Figura 3. Inestabilidad lateral del muro previo a la fluencia [33], [35]

Investigaciones recientes [35], [36], [37], demuestran que estos modelos arrojan resultados aceptables y aplicables para la estimación del pandeo en muros estructurales. El presente trabajo está enfocado en la selección del modelo que mejor represente las características del sistema de muros estructurales en la ciudad de Bucaramanga. La selección se realizó a partir de los modelos utilizados actualmente en la literatura científica. Además, se incluyó la revisión de los modelos de pandeo fuera del plano con el objetivo de plantear una alternativa para su incorporación y uso a partir del modelo seleccionado.

2. MÉTODO

El desarrollo del trabajo se realiza en tres etapas: primero, la selección del modelo; segundo, su calibración y por último la inclusión de los modelos de pandeo al modelo seleccionado.

2.1 Selección del modelo

Los modelos fueron clasificados usando diferentes criterios, los cuales se establecieron en una matriz de carácter cuantitativo y cualitativo (Tabla 1) que se construyó a partir las siguientes metodologías: Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) y un modelo de puntuación (MP). El primero (PAJ), orienta la toma de decisiones con múltiples atributos, a través de la descomposición del objeto de estudio en una jerarquía de criterios involucrados y su respectiva evaluación por medio de comparaciones sistemáticas entre ellos [38], [39]. El otro (MP), establece la solución a un problema determinado mediante la evaluación de diferentes aspectos [40].

Tabla 1. Categorías y criterios para la matriz de selección del modelo

Complejidad	Aplicabilidad	Accesibilidad	Requerimientos	Funcionalidad	Características
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nivel de formación usuario. ▪ Tipos de falla modelados ¿están acoplados? ▪ Número de parámetros. ▪ Facilidad de calibración. ▪ Modelos constitutivos. ▪ Tiempo de calibración. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilidad de software. ▪ Facilidad de implementación ▪ Representación campaña experimental. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de licencia del modelo. ▪ Sistema operativo. ▪ Disponibilidad código fuente. ▪ Cobertura del soporte técnico. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datos requeridos. ▪ Acceso a internet. ▪ Interfaz y compatibilidad. ▪ Capacidad de computo. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilidad de información. ▪ Desempeño en la calibración. ▪ Desempeño en la validación. ▪ Error en la estimación de fallas. ▪ Tipos de muros modelados. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elástico lineal o Elástico no lineal. ▪ Inelástico (no lineal). ▪ Modelación micro y/o macro. ▪ Compatibilidad de datos. ▪ Método de solución del modelo.

Las categorías designadas para esta selección fueron: Complejidad, aplicabilidad, accesibilidad, requerimientos computacionales, funcionalidad y características de modelado; estas a su vez se subdividieron en criterios, como se muestra en la figura 4. El método consiste en asignar un peso entre 0 y 1 a cada criterio según el grado de importancia. Ambos modelos se implementaron de manera conjunta, el PAJ valida los valores porcentuales asignados previamente con MP calculando la razón de consistencia. Una vez definidos los pesos, se asignó una calificación de 0 a 5 a los modelos revisados y se operó con los ponderados.

2.2 Calibración del modelo

Se seleccionaron campañas experimentales disponibles en la bibliografía científica con características similares a los muros de la ciudad de Bucaramanga (requisitos mínimos de la NSR-10) y se calibró el modelo con base en la comparación de los resultados de la curva histerética analítica y experimental, a partir del cálculo del error relativo y total tanto de los picos máximos como del área de las curvas, además se aplicó la métrica de semejanza para evaluar la similitud entre las curvas de respuesta experimental y analítica, donde un valor de semejanza igual a 1 representa una similitud exacta entre dos señales en términos de su forma [41].

Al modelar un muro se puede variar la cantidad de elementos SFI-MVLEM en la altura del muro (n) y el número de macro fibras o paneles de CR a lo largo del muro (m), para ilustrar lo anterior se implementará los datos del espécimen W1 descritos en la campaña experimental del Alarcón, de los cual se obtiene una discretización como la mostrada en la Figura 4.

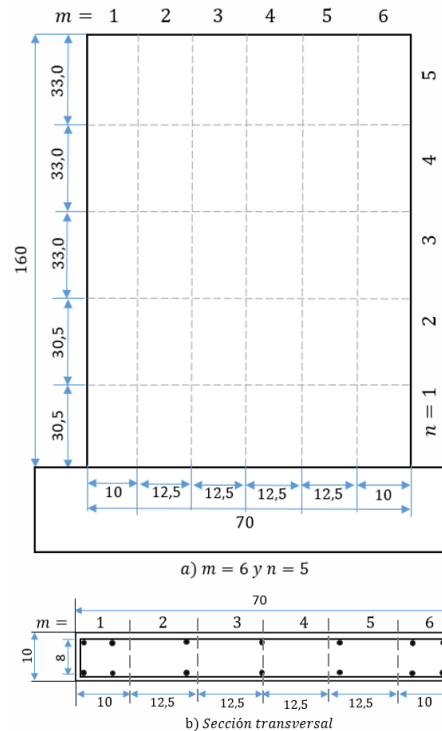


Figura 4. Discretización Espécimen W1

2.3 Inclusión modelos del pandeo al modelo seleccionado

Los cuatro modelos de pandeo mencionados en el inciso 1 (Introducción) se incorporan al modelo seleccionado para complementar sus respuestas, a través del cálculo del criterio de estabilidad (1) y las respectivas deformaciones residuales del acero longitudinal descrito en (2), (3), (4) y (5) a partir de la respuesta del modelo en deformación unitaria crítica a tracción. Una vez el muro alcance esta deformación, en el ciclo posterior ocurre el fenómeno de pandeo.

3. RESULTADOS

3.1 Selección del modelo

Una vez conformados los criterios y categorías con su respectivo valor porcentual, se evaluaron los modelos mencionados en la Introducción de 0 a 5 según sus características y se operó con el ponderado de cada criterio. Por último, se obtuvo el valor acumulado de cada modelo y se eligió el modelo con la mayor calificación. A partir de esto, se seleccionó el macro modelo SFI-MVLEM como la mejor opción según los requerimientos de simulación del presente trabajo. Este modelo desarrollado por Kolozvari [20] incorpora comportamiento de paneles de CR en dos dimensiones para representar los principales tipos de falla en el plano en muros de CR, pero no incluye efectos de pandeo, como se muestra en la Figura 5, los muros se modelan incorporando elementos SFI-MVLEM unos sobre otros en la altura total del muro y se discretiza con tantos paneles como se desee a través del ancho del espécimen.

La metodología de selección multi-criterio, multi-entorno y multi-actores que integra el proceso analítico jerárquico (PAJ) [40] y una de puntuación simple, tiene en cuenta la eficiencia en términos “costo-beneficio” para seleccionar el

modelo más adecuado según las necesidades específicas del trabajo sin necesidad de entrar a realizar comparaciones de las simulaciones de todos los modelos. Con esto también se hace énfasis sobre la claridad respecto al objetivo de modelado, pues en la mayoría de los casos se recomienda utilizar macro modelos, mientras que el uso de micro modelos está reservado a modelaciones detalladas debido a su alto costo computacional.

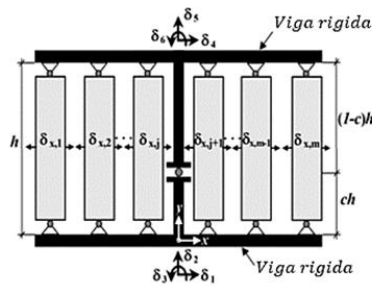


Figura 5. Elemento SFI_MVLEM [20]

3.2 Calibración del modelo

Las campañas seleccionadas para la etapa de calibración fueron las desarrolladas por Thonsem y Wallas (1995), Tran (2012), Alarcón (2013) y Lu et al. (2017). El proceso de calibración se realizó a partir de la variación de los dos parámetros de mayor sensibilidad del SFI-MVLEM que son: Interacción por cortante del agregado (y Acción de dovela (α) [19]. Se obtuvo un total de doce curvas por cada uno de los nueve especímenes de las campañas experimentales (Figura 6). De lo cual se evidencia que el modelo tiene una representación aceptable frente a los datos experimentales, con errores totales de picos entre el 4% y 25%, errores totales de área entre 3% y 22% y valores de semejanza de 0,9 (Figura 7).

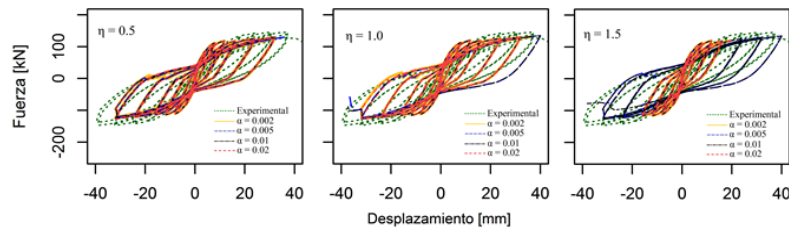


Figura 6. Calibración parámetros η y α para espécimen W1 de la campaña experimental de Alarcón

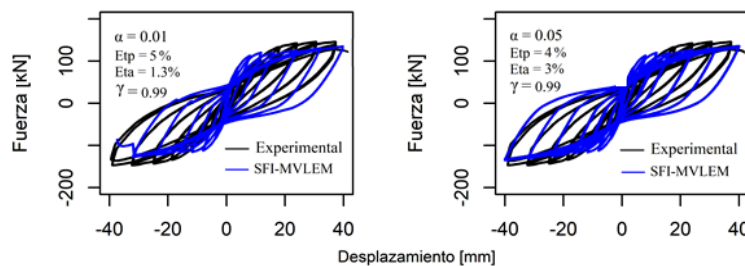


Figura 7. Errores calibración con $\eta = 1$ para W1

Nota: Se muestra dos de las modelaciones para el espécimen W1 variando los valores de α y η constante, con sus respectivos errores.

El SFI-MVLEM es completo en términos de representación del comportamiento y tipos de falla en el plano para muros estructurales, incorpora las respuestas de flexo-compresión y cortante adecuadamente. Los errores son aceptables y validan los errores bajos de áreas obtenidos de manera global. Las curvas analíticas se ajustan bien a los datos experimentales. Aunque se requiere gran cantidad de simulaciones para determinar la incidencia de las variaciones en los parámetros.

3.3 Inclusión modelos del pandeo en el modelo seleccionado

Una de las principales diferencias entre los cuatro modelos de pandeo revisados es la longitud de pandeo que asumen para calcular la deformación residual máxima del acero, por lo cual se aplicaron las longitudes de pandeo disponibles a cada uno de los cuatro modelos con el objetivo de verificar cual otorga la mejor estimación de pandeo al ser contrastadas con los datos experimentales. Una vez integrados los modelos de pandeo, el SFI-MVLEM ofreció una simulación adecuada de las principales fallas encontradas en los sismos de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011) como se muestra en la Tabla 2 para los especímenes de Alarcón 2013.

Tabla 2. Error relativo SFI-MVLEM-MP vs. Campaña experimental Alarcón

Espécimen	% Deriva	Pandeo experimental (mm)	MPHKC (mm)	Error	MPPP (mm)	Error	MPCE (mm)	Error	MPPM (mm)	Error
W1	1,5	26	21,3	18%	13,0	50%	17,5	33%	17,5	33%
W2	1,5	26	22,1	15%	13,7	47%	17,9	31%	17,9	31%
W3	1,5	26	24,0	8%	16,4	37%	22,5	13%	22,5	13%

Debido a su principal limitación el SFI-MVLEM sobrestima la capacidad real de desplazamiento de los especímenes pues no tiene en cuenta la pérdida sustancial de rigidez y resistencia asociada al efecto de pandeo inelástico fuera del plano, por lo que se decidió incorporar los cuatro modelos de pandeo. Cabe resaltar que estos están basados en modelos fenomenológicos más complejos de los que se quiere incorporar para efectos prácticos de análisis y diseño, pero otorgan resultados aceptables y aplicables. El modelo de Paulay y Priestley [32] subestima resistencia de la sección al pandeo (es más conservador) podría implementarse para diseño, mientras que modelo de Haro el cual predice con mayor exactitud dicha capacidad, es más adecuado para evaluación.

Los resultados obtenidos en diferentes ensayos de laboratorio permiten intuir que los muros delgados de concreto reforzado (como los usados en Colombia) presentarán modos de falla similares a los observados en Chile y Nueva Zelanda ante un sismo fuerte. Para confirmar esto, se realizó el modelado de dos muros con características típicas de la ciudad de Bucaramanga (Muro esbelto, acero mínimo, concreto de 21 f'c con espesor de 15 cm). Se tuvieron en cuenta dos escenarios: un muro con elementos de borde y malla electrosoldada como refuerzo del alma y otro solo con malla electrosoldada, para la cual se consiguieron los datos mecánicos de Carrillo, Diaz y Arteta [42]. Para el primer escenario se lograron resultados similares a los evidenciados en Chile y Nueva Zelanda, es decir flexo-compresión y pandeo, mientras que, para el segundo escenario el muro no alcanzó a desarrollar su capacidad debido a la condición frágil de la malla electrosoldada y ni siquiera se logró evidenciar pandeo porque primero se fracturó el acero de refuerzo.

4. CONCLUSIONES

Del análisis de eficiencia realizado entre los modelos usados en la bibliografía científica reciente, el que mejor se adapta para representar el comportamiento de muros delgados de concreto reforzado de acuerdo a los requerimientos particulares de este proyecto es el macro modelo SFI-MVLEM. Al complementar la principal limitación del SFI-MVLEM incorporando los modelos fenomenológicos de pandeo desarrollados hasta el momento como formulaciones simplificadas del fenómeno real [32], [34], [35] y [29], se obtiene un modelo capaz de representar las principales tipologías de fallas en muros de concreto reforzado incluyendo la estimación del pandeo inelástico fuera del plano de acuerdo a lo observado en las campañas experimentales.

Además, los avances investigativos han permitido establecer los parámetros que afectan en mayor medida la ocurrencia de falla fuera el plano, determinadas principalmente por las propiedades geométricas del muro como altura, longitud y espesor; también, se ha identificado una influencia significativa en la deformación axial, ancho de la grieta y excentricidad del refuerzo longitudinal.

Por lo anterior, hay que resaltar que las características geométricas, propiedades mecánicas y disposición del refuerzo juegan un rol importante en el comportamiento del muro, sobre todo en la probabilidad de ocurrencia del pandeo y dado que en Colombia los muros tienden a ser de espesores más bajos que los utilizados en Chile y Nueva Zelanda, tienen mayor susceptibilidad al pandeo inelástico fuera del plano. Sumado a esto, el uso de malla electrosoldada nacional puede ocasionar fractura del refuerzo incluso antes de presentar pandeo, pues no posee capacidad de deformarse como lo menciona Blandon et al. [43] por lo tanto no se recomienda su uso para muros con características DES (disipación especial de energía, definida en la NSR-10). Por último, se debe tener cuidado con la interpretación del modelo a la hora de trabajar con acero frágil como la malla electrosoldada, pues el modelo de Menegotto y Pinto, implementado en el SFI-MVLEM, no está calibrado para acero con estas características.

Agradecimientos

El trabajo presentado hace parte del proyecto de investigación 1895 “Estudio del comportamiento sísmico de edificaciones tipo túnel en zonas de alta amenaza sísmica. Fase 1”, financiado por la Universidad Industrial de Santander y su desarrollo es liderado por el grupo de investigación INME. Además, agradecimiento especial al profesor Yiqiu Lu de la Universidad de Auckland, Nueva Zelanda; al MSc. Cristóbal Alarcón y el profesor Matías Hube de la Universidad Católica de Chile por compartir los datos de sus respectivas campañas experimentales.

REFERENCIAS

- [1] C. E. Pérez, “Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón” Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en ingeniería, Universidad de Cataluña, abril de 2010. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/8398> [Acceso: Oct 17, 2018].

- [2] R. Jünemann, J. C. de la Llera, M. A. Hube, L. A. Cifuentes. and E. Kausel, "A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake," *Engineering Structures*, Vol. 82, pp. 168–185, 2015.
- [3] B. S. Smith and A. Girgis, "Simple analogous frames for shear wall analysis," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 110, no. 11, pp. 2655–2666, 1984.
- [4] J. Moreno and J. Lopez, "Evaluación experimental del comportamiento biaxial de muros en concreto reforzado," bachelor thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2017.
- [5] K. Galal, and H. El-Sokkary, "Advancement in Modeling of RC Shear Walls," presented at 14 The World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [6] J. Carrillo and S. Alcocer, "Backbone Model for Performance-Based Seismic Design of RC Walls for Low-Rise Housing," *Earthquake Spectra*, Vol. 28, No. 3, pp. 943-96, 2012.
- [7] V. Matsagar, *Advances in structural engineering*, 2nd ed. New Delhi: Springer, 2014. [E-book] Available: Springer.
- [8] R. E. Sedgh, R. P. Dhakal and A. J. Carr, "State of the Art: Challenges in analytical modelling of multi-story shear wall buildings," presented at: New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE) Annual Technical Conference, Rotorua, Nueva Zelanda, 2015.
- [9] R. Park and T. Paulay, "*Reinforced Concrete Structures*", New York: John Wiley and Sons, Inc., 1975.
- [10] F. F. Taucer and E. Spacone, "A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures," College of Engineering, Universidad de California, Berkely. Tech. Report UCB/EERC-91/17, Dec. 1991.
- [11] P. P. Diotallevi, L. Landi and F. Cardinetti, "A fibre beam-column element for modelling the flexure-shear interaction in the non-linear analysis of RC structures," presented at 14 The World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [12] F. C. Filippou and F. Taucer, "Fiber beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: part I formulation," *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol. 25, No. 7, pp. 711–725, 1996.
- [13] G. Monti, F. Filippou and E. Spacone "Reinforced concrete fiber beam element with bond-slip," *Journal of structural engineering*, Vol. 126, No. 6, pp. 654-661, 2000.
- [14] P. Kotronis, F. Ragueneau, and J. A. Mazars, "simplified modeling strategy for R/C walls satisfying PS92 and EC8 design," *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 8, pp. 1197–1208, 2005.
- [15] P. G. Papadopoulos, H. Xenidis, P. Lazaridis, A. Diamantopoulos, P. Lambrou, and Y. Arethas, "Achievements of Truss Models for Reinforced Concrete Structures," *Open Journal of Civil Engineering*, Vol. 2, pp.125–131, 2012.
- [16] A. Martínez, and R. Daza, "Modeling of thin reinforced concrete walls," presented at VIII Congreso Nacional de ingeniería sísmica, Barranquilla, Colombia, 2017.
- [17] T. Takayanagi and W. C. Schnobrich, "Computed behavior of reinforced concrete coupled shear walls," Universidad de Illinois. Urbana, Illinois, Tech. Report No. SRS 434, Dec. 1976.
- [18] T. Kabeyasawa, H. Shiohara, S. Otani and H. Aoyama, "Analysis of the Full-Scale Seven-Story Reinforced Concrete Test Structure," *ACI structural journal*, Vol. 84, p.p. 203-239, 1984.
- [19] K. Orakcal, J. Wallace and J. P. Conte, "Flexural Modeling of Reinforced Concrete Walls— Model Attributes," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 5, 688- 698, 2004.
- [20] K. Kolozvari, K. Orakcal and J.W. Wallace, "Modeling of Cyclic Shear-Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls. I: Theory," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, No. 5: 04014135, 2015.
- [21] D. Ulugtekin, "Analytical modeling of reinforced concrete panel elements under reversed cyclic loadings," M. S. thesis, Boğaziçi University, Estambul, Turquía, 2010.
- [22] K. Kolozvari, T. A. Tran, K. Orakcal and J. W. Wallace, "Modeling of Cyclic Shear-Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls. II: Experimental Validation," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, No. 5: 4014136, 2015.
- [23] K. Kolozvari, K. Orakcal and J.W. Wallace, "New OpenSees models for simulating nonlinear flexural y coupled shear-flexural behavior of RC walls and columns," *Computers and Structures*, Vol. 196, pp. 246–262, 2018.
- [24] Folié, R. y Petronijević, P. (2014). Modelling of RC walls under seismic actions. In S. Facultad de Ingeniería Civil (Ed.), Conferencia internacional de logro moderno en ingeniería civil 25 (pp. 241–247). Revista de la facultad de ingeniería civil.
- [25] F. Dashti, A. Jalali and S. Malekpour, "Parametric investigations on an RC wall macro model," *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 329–335, 2011.
- [26] K. Kolozvari and J.W. Wallace, "Practical Nonlinear Modeling of Reinforced Concrete Structural Walls," *American Society of Civil Engineers*, Vol. 142, No. 12: G4016001, 2016.
- [27] F. Dashti, R. P Dhakal and S. Pampanin, "An experimental study on out-of-plane deformations of rectangular structural walls subject to in-plane," presented at 16th World Conference on Earthquake - 16WCEE 2017. Santiago de Chile, 2017.
- [28] T. Paulay and W.J. Goodsir. "The ductility of structural walls," *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering* Vol. 18, No. 3, pp. 250– 269, 1985.
- [29] A. G. Haro, "Assessment of the out-of-plane buckling instability of ductile reinforced concrete structural walls," doctoral thesis, North Carolina State University, 2017.
- [30] F. Dashti and S. Pampanin, "Simulation of out-of-plane instability in rectangular rc structural walls," presented at II European conference on Earthquake Engineering and seismology, Istambul, Turkey, 2014.
- [31] P. F. Parra and J.P. Moehle, "Lateral Buckling in Reinforced Concrete Walls," presented at tenth National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, 2014.
- [32] T. Paulay and M. Priestley, "Stability of ductile structural walls," *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 4, pp. 385–392, 1993.
- [33] C. Herrick and M. Kowalsky, "Out-of-Plane Buckling of Ductile Reinforced Structural Walls due to In-Plane Loads," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 143, No. 3: 04016182, 2017.
- [34] Y. H. Chai and D.T. Elayer, "Lateral stability of reinforced concrete under axial reversed cyclic tension and compression," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No.5, pp. 780–789, 1999.
- [35] P. F. Parra and J. P. Moehle, "Stability of slender wall boundaries subjected to earthquake loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 114, No. 6, pp. 1627–1636, 2017.
- [36] J. Sarango and A. G. Haro, "Comportamiento histerético del acero de refuerzo longitudinal en elementos de borde de muros estructurales de hormigón armado," presented at *Congreso de Ciencia y tecnología*, Pichincha, Ecuador, 2018.

- [37] D. T.-W. Looi and R. K. L. Su, "Seismic Axial Collapse of Shear Damaged Heavily Reinforced Shear Walls Experiencing Cyclic Tension-Compression Excursions: A Modified Mohr's Axial Capacity Model," *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 1, No. 22, pp. 1363-2469, 2018.
- [38] F. Medina, R. Concepción, J. Villanueva and L.F. Álvarez, "Aplicación de técnicas de toma de decisión multi-criterio discretas al proceso de selección de proveedores sanitarios," presented at XIV International congress on project engineering, Madrid, España, 2010.
- [39] T. L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process", New York: McGraw-Hill Book Co., 1980.
- [40] H. Roche and C. Viejo, "Métodos Cuantitativos Aplicados a la Administración: Análisis Multi-criterio en la Toma de Decisiones," Facultad de Ciencias Económicas y de Administración de Montevideo, Uruguay, 2005.
- [41] M. Celorio, "Modelación numérica de la atenuación anelástica de ondas sh mediante el método de elementos espectrales," M. S. thesis, Universidad del Quindío. Armenia, Quindío, 2018.
- [42] J. Carrillo, C. Diaz and C. Arteta, "Tensile mechanical properties of electro-welded wire meshes in Bogotá, Colombia," *Construction and Building Materials*, Vol. 195, pp. 352-362, 2019.
- [43] C. Blandon, C. Arteta, R. Bonett, J. Carrillo, K. Beyer, and J. Almeida, "Response of thin lightly-reinforced concrete walls under cyclic loading," *Engineering Structures* Vol. 176, pp. 175-187, 2018.

Principios metodológicos para el desarrollo de un plan tecnológico de renovación de balasto de una vía ferroviaria: Revisión sistemática de la literatura

Jhoan A. Navarro T.¹
Leonel F. Castañeda H.²
Silvana Montoya N.³
Universidad EAFIT – Colombia

Este capítulo de revisión literaria hace parte del desarrollo de un plan tecnológico para la renovación del balasto (PTRB) de una vía ferroviaria. El objetivo general de este trabajo se enmarcó en la presentación e integración los diferentes puntos de vistas científicos, técnicos y académicos sobre el tema de tecnologías y renovación de balasto. Para esto, el documento se dividió en tres partes. Primero, se presentaron los elementos claves para la construcción del PTRB siguiendo los lineamientos establecidos en la guía Project Management Body of Knowledge (PMBok) del Project Management Institute (PMI), sabiendo que esta guía se enfoca en el control y monitoreo como elementos esenciales para desarrollar proyectos. Segundo, se señalaron las fases de desarrollo de planes tecnológicos y se desarrolló una metodología de ejecución de las tres primeras fases de desarrollo de planes tecnológicos. Por último, se presenta la integración entre la guía PMBoK y las fases del PTRB. Finalmente, a partir de los resultados de la revisión bibliográfica y el desarrollo metodológico, se evidenció la importancia de entrelazar los procesos establecidos según el PMBoK y las fases de desarrollo de planes tecnológicos, todo esto con el fin de establecer estrategias de intervención del balasto que vayan acorde con la realidad de la problemática a abordar. Seguido, el desarrollo metodológico en cadena permite el diseño adecuado de un programa de trabajo y seguimiento de labores de renovación de balasto que van en línea con las condiciones de trabajo y la tecnología disponible.

1. INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo industrial a nivel mundial y el despliegue de las nuevas tecnologías, el transporte férreo se hizo necesario para la evolución y minimización de costes dentro de las naciones emergentes, por la necesidad de comercialización, comunicación, y el aumento en la demanda de transporte de mercancías y pasajero entre los distintos territorios [1]. En Colombia el primer proyecto de trenes llegó a en el año 1855, con el llamado Ferrocarril de Panamá, más adelante entre 1866 y 1885, se inician proyectos ferroviarios tales como el del Ferrocarril de Antioquia, Girardot; del Norte, entre otros [2], [3]. De esta manera junto con el desarrollo ferroviario tanto en Colombia como a nivel mundial, se hizo importante el tema de las vías, su construcción, mantenimiento y, en lo que respecta a este capítulo, la renovación de la capa de balasto.

El balasto es el principal material que compone la mayoría de los sistemas ferroviarios a nivel mundial y es poco probable que esto cambien en un futuro previsible [4], [5]. El balasto es un material granular, también llamado agregado o grava, que se utiliza a lo largo de la vía férrea, el cual debe contar con especificaciones, tallas y características específicas para su utilización [6], [7], todo esto para brindarle resistencia a la vía [8], además de distribuir las tensiones entre los durmientes, proporcionar estabilidad, mantener el ancho de vía y facilitar el mantenimiento y el drenaje de aguas lluvias [9].

Sin embargo, estas características ideales se van perdiendo con el tiempo. Así, por un lado, debido a su utilización y por las cargas cíclicas a las que es sometido el balasto se va deteriorando y con ello la geometría de la vía, por otro lado, debido al mantenimiento y deterioro de las rocas que componen el lecho de balasto, se va contaminando con partículas finas y otros materiales que afectan las propiedades funcionales del material, tales como el drenaje de las aguas [10] - [15]. De aquí se deriva la importancia de mantener la vía de balasto en las condiciones precisas según el diseño, junto con el estudio de las tecnologías utilizadas en las actividades de mantenimiento y renovación [16], teniendo en cuentas los lineamientos en lo que respecta a la gestión de proyectos y el desarrollo de planes tecnológicos.

De esta manera, para integrar las fases de planes tecnológicos con los procesos de gestión de proyectos, primero se presentan los lineamientos establecidos en la guía PMBoK [17], [18], seguido de como este influye en el proceso de gestión de proyectos, y finalmente de qué manera integrar estos proceso con las fases de planes tecnológicos [19]. La amplia experiencia del PMI como asociación sin ánimo de lucro de profesionales en el campo de la gestión de proyectos, permite desarrollar ideas innovadoras en la planeación, seguimiento, monitoreo y cierre de proyectos, por medio de guías, certificaciones, congresos y formación de profesionales en el campo de la gestión que además son muy reconocidas a nivel mundial.

El capítulo está dividido en tres partes: En la primera parte, se presenta la metodología utilizada en la investigación, la cual tiene como propósito suministrar las pautas para el diseño del Plan Tecnológico para la Renovación del Balasto de una vía ferroviaria. La segunda parte, abarca los resultados obtenidos del proceso de revisión bibliográfica en donde

¹ *inv_jnavarro@eafit.edu.co*

² *lcasta@eafit.edu.co*

³ *smontoyan@eafit.edu.co*

se expone ampliamente sobre los elementos claves para la construcción de un PTRB de una vía ferroviaria, que incluye todo lo referente al tema de gestión de proyectos, establecidos en la guía PMBoK, para desarrollar proyectos y tener control y monitoreo sobre los mismos. Por último, se presentan las fases de desarrollo de planes tecnológicos y como se integra esto último con los procesos expuestos en la guía del PMI. Es preciso aclarar que la investigación se enfoca principalmente en la integración entre la guía PMBoK y las tres primeras fases del PTRB donde se concentran el mayor número de procesos y subprocesos establecidos según la guía del PMBoK.

2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El tema de renovación de balasto de vías ferroviarias es una materia débilmente investigada, especialmente en países como Colombia donde la infraestructura férrea no es de gran tamaño, comparado con los países europeos y en su mayoría desarrollados. En la Tabla 1 se presentan los documentos principales de la revisión bibliográfica en cuanto a las labores y tareas de intervención con las cuales se construyen los programas de trabajo para la renovación del balasto.

Tabla 10. Resumen de revisión bibliográfica sobre el balasto

Fuente	Aporte
[4]	En este documento se describen algunos modelos de asentamiento de balastos empíricos actuales y los evalúa utilizando datos experimentales generados utilizando la Instalación de Pruebas Ferroviarias de Southampton (SRTF).
[6]	Examina la historia de las especificaciones de balasto para comprender cómo se han desarrollado a lo largo de los años.
[7]	A través de este artículo se identificó la calificación del balasto con diferentes objetivos de rendimiento, por medio del grado relacional gris (GRG) para convertir un problema de optimización de objetivo múltiple a un objetivo único, y así encontrar la alternativa óptima de los factores de gradación del balasto para minimizar simultáneamente la deformación y la degradación permanentes, al tiempo que aumentan el módulo elástico, la resistencia al corte y la densidad de este.
[10]	En el documento de desarrollaron dos índices, el primero es el índice de degradación de la geometría del balasto (BGI) y segundo índice de contaminación del balasto (BFI), los cuales son indicadores del comportamiento mecánico del balasto.
[12]	En este artículo se desarrollan las investigaciones estadísticas de cuatro muestras de granito triturado tomadas de la capa no compactada de la cinta transportadora (TB), de la planta de almacenamiento (PS), del vagón (<i>wagon W</i>) y de la construcción de las vías férreas (RC).
[13]	Proporciona un conjunto de recomendaciones y pautas para el uso de tecnologías de mejoramiento de respuesta y durabilidad de las vías ferroviarias.
[16]	Presenta una metodología que permite mayor comprensión del comportamiento mecánico del balasto y su degradación, para anticipar mejor una planificación eficiente de las intervenciones en las vías férreas.
[20]	Simula la condición de deterioro de la vía ferroviaria utilizando un modelo de degradación de pista existente, para determinar si se necesitan restricciones de velocidad relacionadas con la seguridad y qué trabajo de intervención inmediato se requieren
[21]	En este artículo se estudia la posibilidad de detectar el estado de daño del balasto debajo de un durmiente, al monitorear la vibración del durmiente correspondiente mediante una simple prueba de martillo de impacto (<i>hammer impact test</i>).
[22]	Este documento presenta los resultados obtenidos de unas pruebas hechas en el balasto de una red ferroviaria en Grecia, además presenta un nuevo método para la estimación de la contaminación del balasto en función de la dureza del balasto. Entre los resultados principales se encuentra que la dureza del balasto influye en la contaminación del mismo por partículas finas y, por consiguiente, en el ciclo de vida o vida útil. Esto conduce a la determinación de una calidad mínima para las especificaciones técnicas en relación con las condiciones del tráfico (tonelaje diario).
[23]	Este documento presenta un enfoque integrado para el análisis dinámico del comportamiento de las zonas de transición de las vías férreas utilizando instrumentación de campo, modelado analítico, así como simulaciones numéricas utilizando el Método de Elementos Discretos (DEM).
[24]	Los autores proponen una serie de modelos de mantenimiento para infraestructuras ferroviarias que puedan ayudar a tomar mejores decisiones a la hora de realizar dichas intervenciones. Los modelos fueron construidos utilizando las redes de Petri coloreadas (<i>Coloured Petri nets</i>), y se animan a través de simulaciones del método Montecarlo para estimar el rendimiento de las políticas de mantenimiento en términos de costo y disponibilidad.
[25]	El objetivo de este documento es ofrecer una visión global en el campo del mantenimiento de una infraestructura ferroviaria, los problemas de planificación que contiene y la investigación que se ha realizado hasta el momento.
[26]	El desarrollo de este artículo se centra en la solución al problema que ha llevado el incremento de las vías ferroviarias hechas de balasto, dichas vías necesitan mantenimiento y en muchos casos puede ser costoso. De este modo el Neoballast surge como una solución de balasto de alto rendimiento, duradero y amigable con el medio ambiente.
[27]	Este documento utiliza el código PFC ^{2D} del Método de Elementos Discretos (DEM) para modelar el comportamiento del balasto del ferrocarril bajo cargas cíclicas, se señala además que el método de elementos discretos es el enfoque más adecuado para simular el comportamiento mecánico de materiales granulares bajo gran esfuerzo.
[28]	Los autores se centran en la utilización de una serie de instrumentas basada en las vías, con el propósito de evaluar la naturaleza y el alcance de los defectos producidos sobre esta (cambio de nivel, hundimiento). Finalmente, se utilizaron los resultados encontrados para monitorear la efectividad y la duración de la reparación.

A nivel gerencial, todo lo referente al PMBoK sirve como guía para la metodología de construcción del PTRB. Sin embargo, a nivel técnico, para desarrollar las actividades a realizar en campo se hace necesario el análisis teórico de todo lo referente al balasto y las posibles medidas de intervención que durante años se han desarrollado en el tema de renovación del balasto.

Finalmente, integrar la estructura metodológica para la creación de planes tecnológicos y la estructura establecida por el PMI se presenta como una alternativa para la gestión de proyectos ferroviarios. Por medio de esta alternativa tanto el equipo de trabajo como los planeadores estructuran propuestas reales acorde a las necesidades puntuales de la empresa. Dichas necesidades son resultado de un análisis exhaustivo y de la correlación de los procesos del PMI y fases de los planes tecnológicos.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

Esta sección presenta los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica. Primero, se presenta la definición de conceptos claves para la construcción de un plan tecnológico. Luego se presentan las etapas desde su inicio hasta su implementación y ajuste. La primera parte presenta una integración de procesos de gestión de proyectos con las fases metodológicas de la elaboración de un plan tecnológico en el ámbito ferroviario, específicamente para la renovación de una vía de balasto.

3.1 Elementos claves para la construcción de un PTRB

Para la gestión y monitoreo de los proyectos se deben tener en cuenta las diferentes normas o guías que direccionan esta labor. El PMBoK es una guía reconocida mundialmente para la profesión de gestión de proyectos, dicha guía es publicada por el PMI [17], [18]. La metodología plasmada en el PMBoK asegura que el objetivo del proyecto sea alcanzado. Con la finalidad de mejorar el rendimiento y por ende los resultados. Perrier et al. [29] utilizan dicha metodología que junto con la última edición del PMBoK [30] se basa en los siguientes procesos principales:

- *Gestión de la integración del proyecto:* Se compone de todos los procesos dirigidos a la unificación del proyecto, las cuales deben aplicarse desde el inicio hasta su consolidación.
- *Gestión del alcance del proyecto:* Integra todos los procesos que aseguren que en el proyecto se incluya todo lo requerido para finalizarlo con éxito.
- *Gestión del cronograma del proyecto:* Incluye todos los procesos para administrar el adecuado cumplimiento de las actividades consolidadas y la finalización a tiempo del proyecto.
- *Gestión de los costos del proyecto:* Se compone de todos los procesos que integran la planificación presupuestal y financiera del proyecto.
- *Gestión de la calidad del proyecto:* Integra todos los procesos dirigidos a la incorporación de la política de calidad de la organización dentro de la planificación del proyecto.
- *Gestión de los recursos del proyecto:* Se compone de todos los procesos que garantizan que todos los recursos estén disponibles en el momento y lugar adecuado.
- *Gestión de las comunicaciones del proyecto:* Incluye los procesos necesarios para lograr un intercambio eficaz de información con todos los interesados en el proyecto.
- *Gestión de los riesgos del proyecto:* Integra todos los procesos que aseguran la gestión, identificación, análisis, respuesta y monitoreo de los riesgos del proyecto.
- *Gestión de las adquisiciones del proyecto:* Se componen de los procesos necesarios para la adecuada gestión y de control requeridos para desarrollar y administrar acuerdos tales como contratos, órdenes de compra, memorandos de acuerdo (MOAs) o acuerdos de nivel de servicio (SLAs) internos.
- *Gestión de los interesados del proyecto:* incluye los procesos requeridos para identificar a las personas, grupos u organizaciones que pueden afectar o ser afectados por el proyecto.

Los procesos antes mencionados, son continuos y según las necesidades se pueden aplicar no sólo en el plan por sí solo, sino en todas sus fases. En el apartado siguiente, se correlacionan e integran los diferentes subprocesos que forman a su vez los procesos principales, en miras de desarrollar un plan tecnológico en base a la metodología expuesta por el PMI. Esto permite obtener un control sobre todo el proyecto, de la misma forma que le permite al gerente, por ejemplo, predecir los resultados esperados y la toman medidas según sea el caso en un tiempo determinado [31], [32].

3.2 Desarrollo del PTRB de una Vía Ferroviaria

Como se expone anteriormente, los procesos establecidos en el PMBoK deben integrarse dentro de la metodología utilizada en los planes tecnológicos, en donde se destaca las siguientes fases [33], [34]:

1. *Diagnostico estratégico de la empresa:* Es el reconocimiento inicial de las distintas políticas y actuares de las organizaciones permite visualizar y esquematizar las diferentes estrategias que se llevan a cabo dentro de las organizaciones.
2. *Prospectiva Tecnológica de la empresa:* involucra la creación de escenarios para la selección de tecnologías óptimas para el desarrollo en este caso de la renovación de la vía de balasto.
3. *Diseño del PTRB de una vía ferroviaria:* Involucra la selección del objetivo tecnológico de la empresa, las diferentes estrategias tecnológicas y la definición de programas y tareas.

4. *Implementación del PTRB de una vía ferroviaria:* La fase de implementación involucra todo lo concerniente al seguimiento de las diferentes actividades establecidas según el cronograma establecido, para asegurar el éxito del proyecto.
5. *Seguimiento y monitoreo del PTRB:* Se establecen todos los indicadores con los cuales se medirá el avance el proyecto en general, por sus diferentes etapas e incluso por cada una de las tareas expuestas.
6. *Ajuste y modificación del PTRB:* De acuerdo con la experticia del grupo de trabajo y la experiencia de los profesionales en este campo se establecen las medidas y tiempos en los cuales sea necesario el ajuste o modificación de dicho plan.

3.3 Integración de la metodología PMI con las Fases metodológicas del PTRB

Lo anterior se basa en la estructuración hecha por Porras [19] para abordar temas de sostenibilidad de proyectos en su fase de planeación. De igual manera, existen una serie de publicaciones que pueden ayudar a expandir la visión sobre el tema de sostenibilidad en los proyectos, si es de algún interés para el lector [35], [36]. La Tabla 2 refleja una integración de la metodología plasmada en el PMBoK con la metodología utilizada para la elaboración de planes tecnológicos. Por medio de un ejemplo de la distribución de los diferentes procesos por grupos de subprocesos según la guía del PMBoK y las fases metodológicas dentro de la construcción del PTRB.

Tabla 11. Integración de los procesos de gestión de proyectos del PMI con las Fases metodológicas del PTRB [19], [30]

Áreas de conocimiento según la Guía PMBoK	Grupo de procesos del PMI						Total de procesos por fases
	Inicio		Planeación	Ejecución	Monitoreo y control	Cierre	
	Diagnostico estratégico empresa	Prospectiva Tecnológica empresa	Diseño del PTRB de una vía ferroviaria	Implementación del PTRB de una vía ferroviaria	Seguimiento y monitoreo del PTRB	Ajuste y modificación del PTRB	
Integración		1	2	1	2	1	7
Alcance		1	3		2		6
Cronograma			5		1		6
Costos			3		1		4
Calidad		1	1	1			3
Recursos		1	3	1	1		6
Comunicación		1	2				3
Riesgos			5	1	1		7
Adquisición			1	1	1		3
Interesados		1	1	1	1		4
Total de procesos por grupo		6	26	6	10	1	49

En la primera columna se despliegan los procesos principales establecidos en el PMBoK, cada uno de ellos se compone de un número determinado de subprocesos (como se establecen en este documento). En la última columna se presenta una sumatoria, el número corresponde a la cantidad de subprocesos según su categoría principal (integración, alcance, etc.), todos estos se describen en la guía PMBoK. El resto de las columnas que se encuentran en medio de las ya mencionadas, corresponden a las fases de elaboración del PTRB, cada una de ellas se integra con los procesos establecidos en la primera columna y el número asignado en cada de una de ellas, es igual al número de subprocesos correspondientes por fase. En la última fila se presenta la sumatoria de subprocesos por fases, en donde se evidencia con claridad que, en la fase de diseño, que corresponde al proceso de planeación, es donde se desarrolla el mayor número de subprocesos.

3.4 Diagnóstico estratégico

El reconocimiento inicial de las distintas políticas y actores de las organizaciones permite visualizar y esquematizar las diferentes estrategias que se llevan a cabo dentro de las organizaciones. Con estas estrategias se afrontan las diferentes barreras y/o inconvenientes en todos los ámbitos de la empresa. Por lo tanto, el desarrollo del diagnóstico estratégico dentro del PTRB permite "(...) revelar y preparar sistemáticamente las barreras a corto plazo y los obstáculos a largo plazo para las estrategias" [37] implementadas dentro de planeación.

3.4.1 Identificación de problemas de orden estratégico

En el campo de infraestructura ferroviaria, Lidén [25] ofrece una visión global de los problemas a la hora de intervenir el balasto. Los problemas tienen impactos en dos etapas: primero, en la etapa de diagnóstico y, posteriormente, en la etapa de diseño. En la Tabla 3 se recopilan los principales problemas planteados por Lidén [25]. Estos problemas se deben tener en cuenta en la toma de decisiones durante la etapa de diagnóstico del PTRB. Los problemas principales se dividen en cuatro secciones: problemas estratégicos, tácticos, operacionales y otros aspectos. Si no se tienen en cuenta estos problemas, se podrían visualizar sus impactos a largo plazo. De esta manera, el reconocimiento

de estos problemas permite no solo que se prevengan, sino que se generen estrategias entorno a estos posibles escenarios desfavorables en caso de presentarse en la marcha.

Tabla 12. Posibles problemas presentes en las actividades de intervención del balasto. Adaptado de Lidén [25].

Problemas	Descripción
1. Problemas estratégicos	Aseguramiento de las dimensiones de la vía, donde se establecen los niveles de calidad de infraestructura junto con políticas de mantenimiento y renovación; diseño de contrato de renovación, es importante porque la forma en que se diseñen estos contratos tendrá gran impacto en los costos, la calidad y la eficiencia en horizontes de tiempo; y, valoración y localización de los recursos: dichos recursos deben dimensionarse y localizarse de manera eficiente.
2. Problemas tácticos	Planificación de los trabajos de renovación (<i>planning possessions</i>), este es el punto focal para la coordinación del tráfico y los sub-problemas o las formas de abordar los problemas; mantenimiento de los vehículos y encaminamiento del equipo; y reprogramación.
3. Problemas operacionales	Planificación de proyectos de renovación e intervenciones posteriores; tiempo de trabajo y planificación de recursos; y, seguimiento de la planificación de uso.
4. Otros aspectos	Planificación de escenarios; y, operación en tiempo real/control operacional.

3.4.2 Metodología para la toma de decisiones en el marco del diagnóstico estratégico

En la Figura 1, se sintetiza la metodología para la planificación estratégica, que a su vez se subdivide en dos apartados: el primero exploratorio y el segundo estratégico [37]; la parte exploratoria pretende sumergirse en los problemas, obstáculos y/o interrupciones que se pueden presentar a la hora de implementar el PTRB con incidencia en un corto o largo plazo, con la recopilación de esta información se evalúan las distintas estrategias a implementar y con las que se perfila el PTRB. Es importante aclarar que este análisis del diagnóstico estratégico debe hacerse bajo todos los criterios objetivos y políticas de la empresa, como lo son: visión y misión, valores de la empresa, objetivos, estrategia corporativa, productos y/o servicios, expectativas de los clientes, proveedores, tendencias estratégicas, factores competitivos, estrategias y acciones prioritarias.



Figura 15. Metodología para la toma de decisiones en el marco del diagnóstico estratégico [37]

Finalmente, dentro de este proceso se establece una toma de decisión o decisiones al final del proceso de diagnóstico estratégico, este proceso de "(...) *toma de decisiones estratégicas pertenece a una de las áreas más importantes de la administración actual y desempeña un papel crucial para lograr el éxito y la supervivencia*" [38] a largo plazo. Tal es el propósito tanto del diagnóstico estratégico como del PTRB. Así, es esencial la correcta toma de decisiones para impulsar una correcta intervención dentro de las empresas ferroviarias [39], ya que estas pueden ayudar en el análisis de la causa raíz y/o seleccionar estrategias apropiadas [40]. Para ayudar a esta toma de decisiones [41] [42].

3.5 Prospectiva Tecnológica de la empresa

Antes de presentar la prospectiva tecnológica, es importante tener en cuenta los conceptos siguientes: Gestión tecnológica, retos tecnológicos, evaluación tecnológica y tecnologías críticas.

3.5.1 Gestión de la tecnología

El manejo de la tecnología está ligado directamente con la competitividad de las empresas a lo largo de su funcionamiento y prestación del servicio (largo plazo) [43], que junto con la inversión en investigación y desarrollo (I+D) e innovación disminuyendo las incertidumbres con respecto a su a los beneficios futuros [44]. De esta manera, la gestión y manejo de la tecnología involucra primordialmente los activos intangibles [45]. De acuerdo con lo anterior existen dos enfoques para la gestión tecnológica: primero, enfoque de mercado, el cual mide el valor de los activos intangibles mediante la búsqueda de activos similares o idénticos que se negocian en el mercado. Enfoque de costo, por medio de este se toma en cuenta todos los costos y los costos de oportunidad en los que se incurre al recrear o

reproducir un activo intangible nuevo comparable a uno antiguo real. Y, enfoque de ingresos, evalúa los beneficios económicos futuros (ingresos o flujo de efectivo neto) que se generarían a partir del uso de activos intangibles [45].

3.5.2 Retos tecnológicos

Adicionalmente, la gestión tecnológica como disciplina y a nivel de empresa enfrenta una serie de obstáculos o desafíos que se deben tener en cuenta. Cetindamar et al. [46] destaca los siguientes tipos de desafíos que enfrentan los profesionales de este campo a futuro: cambios en los tipos de innovación y transformaciones en los procesos de innovación; cambios en los procesos operacionales, ya que varias perspectivas académicas y prácticas deben integrarse de una manera coherente; sostenibilidad, es un concepto clave que hay que tener en cuenta dentro de todos los proyectos; y finalmente, la integración de servicios con productos, debido al crecimiento e importancia de este sector en las economías de los países. A nivel profesional y de personal, los líderes o personal a cargo del desarrollo tecnológico enfrentan sus propios retos, de los Medcof [47] señala una línea de liderazgo como guía para el mejoramiento la gestión tecnológica. Dadas sus distinciones más específicas en todos sus componentes, dicha línea o tubería (pipeline) se compone de seis niveles en los que se describen los principales retos (de acuerdo a las funciones) a los que se enfrenta un profesional cuando lidera este tipo de proyectos, a continuación, se resalta dicha línea de manera descendente [47]:

- Nivel 6. Gerente de la Empresa: sus retos están ligados con el entregar resultados consistentes; establecer la dirección de la empresa; dar forma a la empresa; mantener una ventaja en la ejecución; gestionar en un contexto global.
- *Subnivel 5a.* Gerente Funcional de la Empresa, entre sus desafíos está el aplicar la perspectiva empresarial a la función; visualizar los cambios necesarios en la función y liderar su implementación.
- Nivel 5. Gerente de Grupo: sus retos son principalmente seleccionar y desarrollar gerentes de negocios competentes. Desarrollo de estrategia de los negocios; conectar los negocios con los objetivos corporativos Estar a cargo de múltiples negocios diferentes.
- *Subnivel 4a.* Gerente Funcional de Grupo, dentro de sus retos se encuentra el integrar las estrategias funcionales de grupo de las empresas de forma coherente; solicita fondos para apoyar esa estrategia; proporciona a los ejecutivos de grupo críticas basadas en negocios de estrategias funcionales y resultados; y gestionar múltiples relaciones de informes.
- Nivel 4. Gerente de Negocios, dentro de sus capacidades y para afrontar los desafíos ellos deben mantener la sostenibilidad del negocio, ingresos y costos; y, aumentar la visibilidad de la empresa y los negocios, tanto por dentro como por fuera.
- Nivel 3. Gerente Funcional, es importante que este sea capaz de analizar la "perspectiva de negocio" y la estrategia; además de la función que existe para respaldar a la organización; y del papel de la función en el contexto de otras funciones; finalmente comunicarse a través de múltiples capas organizacionales.
- Nivel 2. Gerente de Gerentes, dentro de sus retos esta seleccionar y entrenar gerentes de primera línea con excelentes capacidades; responsabilizar a los gerentes de primera línea en su trabajo; Desplegar recursos entre unidades; Gestiona los límites entre unidades.
- Nivel 1. Gerente de Otros, el cual define y asigna el trabajo a realizar; guía y autoriza los informes directos en su trabajo; y, finalmente construir redes sociales positivas para facilitar el trabajo.

3.5.3 Evaluación tecnológica

Dentro de este apartado, un punto clave es el rendimiento tecnológico. El cual depende en gran medida del criterio de los expertos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que dentro de sus opiniones profesionales puede llegar a existir un sesgo producto de la subjetividad y experiencia de estos. Por lo tanto, para el mejoramiento de los resultados a obtener, producto de la gestión de la tecnología, es importante la planeación. Debido a que, si no se consideran las diferentes sinergias e indicadores, puede llegar a ser muy difícil la optimización de la tecnología utilizada, lo que a la larga genera gastos adicionales que no estaban previstos con anterioridad [48]. De igual manera la planeación de la tecnología exige una evaluación, en la que la eficacia es un punto determinativo, es decir debe haber resultados que hayan sido probados a través de su utilización y funcionamiento. Es decisivo, además, que haya una aceptación científica de dicha herramienta tecnológica (publicación de resultados) todo esto sujeto de igual manera a la demanda y el mercado, y por ende que los costos no sean tan elevados. De esta manera se debe considerar los diferentes modelos de evaluación de la tecnología [49].

3.5.4 Tecnologías Críticas

Una tecnología se considera crítica cuando exista una alta demanda y la oferta de este es muy limitada [50], o porque puede ser un resultados, influencia o recursos críticos para un determinado tema o grupo de personas o país [51]. Por

lo tanto, es de especial cuidado y de gran importancia considerar la identificación de este tipo de tecnologías dentro del proyecto. Ya que en base a las tecnologías críticas se pueden llegar a generar según las necesidades, estrategias y políticas que le permitan a las empresas, entidades o países a mejorar su competitividad con respecto al mercado en que se desenvuelven [52]. Para el caso de este documento, la identificación de tecnologías críticas permite que las empresas ferroviarias al momento de planificar la renovación del balasto generan las estrategias adecuadas de intervención y por ende se llegue con mayor facilidad al resultado esperado.

3.5.5 Herramientas de prospectiva tecnológica

El propósito principal de la prospectiva, no es predecir un futuro sino la modificación de las representaciones individuales y la construcción de nuevos marcos para el análisis [53], este apartado junto con el diagnóstico prospectivo son un insumo esencial para el diseño del PTRB, que incluye todo lo relacionado con la manera y que tipo de herramientas que serán utilizadas en el desarrollo de la renovación del balasto de una vía ferroviaria. Existen diversas metodologías para la identificación de tecnologías críticas y prospectiva tecnológica, que involucra la creación de escenarios para la selección de tecnologías óptimas [54] [55], redes de innovación [56], y otros casos de estudios [57], sin embargo no hay una establecida para el área del mantenimiento ferroviario. Aunque las diferentes metodologías antes mencionadas sirven como insumo para la construcción de dicha metodología de trabajo.

En la Figura 2, se presenta una metodología estructura para la elaboración de prospectiva tecnológica de las empresas, en este caso preciso una empresa ferroviaria para las labores de renovación de balasto. La metodología se compone de cuatro fases: La primera parte de toda la información recopilada durante el análisis estratégico, los datos suministrado y la información puede provenir de encuestas, panel de expertos, entre otras. La segunda corresponde a los proveedores en donde se analiza el mercado actual junto con las tecnologías críticas de la empresa. La tercera parte, corresponde a la elaboración de los posibles escenarios, se analiza la competitividad tecnológica de la empresa y se llega unos escenarios futuros y prospectivos. Finalmente, la evaluación conlleva a la selección de opciones más adecuadas según la necesidad de la empresa.



Figura 16. Metodología para la elaboración de prospectiva tecnológica [34], [54]

3.6 Diseño del PTRB de una vía ferroviaria

Este apartado se enmarca en los resultados obtenidos a través de la evaluación tecnológica que se expuso con anterioridad, en donde se parte del establecimiento de un objetivo tecnológico de la empresa y se consolida al final el plan tecnológico. A continuación, se expone una breve explicación de esta metodología (Figura 3).

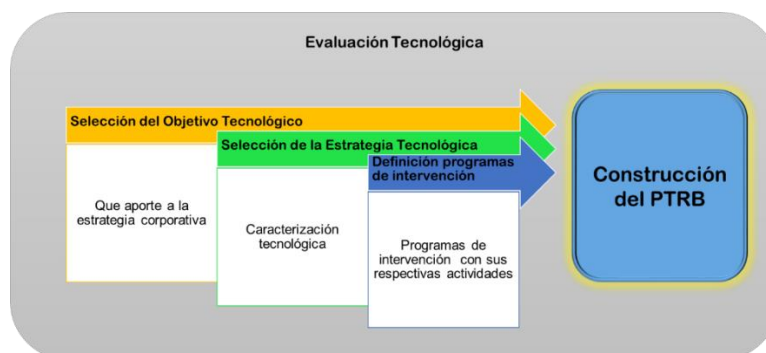


Figura 17. Metodología para el diseño del PTRB [34]

- **Objetivo:** El desarrollo de este objetivo tecnológico se enmarca en los resultados de la evaluación de las tecnologías críticas tanto necesarias como deseadas, todo con el propósito de aportar a la estrategia corporativa [34].
- **Estrategia:** Esta fase se basa en las características tecnológicas que posee o desea poseer la empresa, cruzado con las empresas en competencia del mercado [34].

- *Definición programas de intervención:* Los programas de trabajo se definen mediante actividades como *Brainstorms* por parte de expertos frente a los factores competitivos y a las tecnologías críticas disponibles y/o a implementar en la empresa de acuerdo con la prospectiva tecnológica, como se muestra en la Figura 4.



Figura 18. Pasos para la decisión de programas de intervención

El documento final del PTRB establecerá de igual manera todas las medidas expuestas para la intervención a realizar. Por la naturaleza funcional de las vías férreas, especialmente en las grandes urbes, estas están expuestas a un alto tráfico durante todo el día y todo el año. La finalidad de estos planes es intervenir en un marco de tiempo razonable, que a la vez no interrumpa el servicio de transporte. El documento debe contener por lo mínimo lo siguiente:

- Objetivos del PTRB, que incluya el objetivo general y específicos.
- Alcance del PTRB.
- Análisis de involucrados, que incluya las organizaciones, entidades o empresas que aporten o estén involucradas en el proyecto, de igual forma la población impactada tanto positivamente como negativamente por el PTRB,
- Ámbitos de responsabilidad y competencia, que incluya todo el personal.
- Diagnóstico de las operaciones.
- Programas estratégicos, donde se especifique el equipo de trabajo, recursos físicos y de emergencia, evidencia de capacitaciones, entre otros.
- Programa operativo, que incluya los procedimientos operativos, los planes de acción ante posibles contingencias, organismos de apoyo, entre otros.
- Programas informativos, que incluyan los mapas de riesgos, de localización de recursos estratégicos, entidades de apoyo, entre otros.
- Equipos y maquinaria a utilizar, que incluya todas las características, modelos, rendimientos, etc.
- Cronograma de trabajos.

Esta etapa de diseño corresponde a la etapa de planeación según el PMI, y retomando la Tabla 2, en esta fase se despliegan todos los procesos que se aplican según en PMBoK en los proyectos y es además donde se integran el mayor número de subprocesos. Según el análisis, un total de 26 subprocesos de los 49 en totales se despliegan en esta fase de diseño del PTRB. Por lo tanto, el equipo encargado del diseño del PTRB debe tener en cuenta dentro de la consolidación del documento estos subprocesos, que en total suman más de la mitad de la guía PMBoK.

3.6.1 Herramientas tecnológicas para el diseño de programas de trabajo

Existen diversas herramientas en la actualidad que ayudan a la estructuración de programas de intervención, Microsoft Project Management es una herramienta tecnológica que puede ser de gran ayuda para la elaboración de programas de trabajo, la programación y planificación [58], donde se especifican las diferentes actividades a realizar en campo. Cada una de estas actividades van en función de la disponibilidad de maquinaria y tecnología de la empresa. En el ejemplo se distribuyen también las diferentes tareas, sus tiempos y sus recursos.

Con esta herramienta, no sólo se puede planificar en tiempo real sino también hacerle monitoreo para garantizar los tiempos estipulados. Debido primero, a que el planeador tiene todas las herramientas dentro del software para establecer fechas según calendario, ingresar horario y restricciones de días festivos o de no trabajo. Y, segundo, les permite a los gerentes tener control sobre las diferentes actividades que se llevarán a cabo en todo el proceso. Los programas de trabajo están divididos según las necesidades encontradas en la etapa de diagnóstico, y las restricciones según los problemas encontrados.

3.7 Parte final del PTRB de una vía ferroviaria

Las siguientes fases del PTRB, son parte importante dentro de la gestión de proyectos. Sin embargo, como se expuso previamente no son objeto de abordar puntualmente en este trabajo. Por tal motivo, solo se procederá a exponer puntualmente las siguientes tres fases:

1. *Implementación del PTRB de una vía ferroviaria.* Finalmente, tras la aprobación del PTRB por parte de le empresa, es importa la comunicación de la toma de decisión a toda la compañía. Especialmente a los ejecutores, empleados

y demás partes interesadas. Para tal fin se realiza un programa de comunicación que establezca los elementos comunicacionales, para finalmente realizar el aviso y poner en marcha el PTRB y las actividades pertinentes [34].

2. *Seguimiento y monitoreo del PTRB.* El diseño de los indicadores para monitorear la ejecución del PTRB, es una labor muy importante dentro de la gestión de proyectos. Los indicadores para cada proyecto se definen estableciendo los objetivos de cada uno de ellos, las metas, las variables a medir, formulas, responsables y la autoridad para tomar decisiones [34].
3. *Ajuste y modificación del PTRB.* En esta fase se expondrán las razones y los plazos en los que el plan tecnológico de renovación de balasto será revisado y se actualizado. Esto dependiendo del criterio de los expertos, y muchas de las razones pueden ser: Cuando se requiera introducir nuevas teorías, equipos y/o procedimientos que puedan hacer más eficiente el plan, cuando se emitan o modifique legislación nacional aplicable al tema, cuando existan modificaciones considerables de los corredores viales, entre otras [34].

4. CONCLUSIONES

La guía del PMBoK es un insumo muy importante dentro de la gestión de proyectos, que puede ser adaptada a las necesidades de cualquier plan. Según la experticia y dinámica de los planeadores, jefes de proyectos y el grupo de trabajo se pueden lograr resultados más eficientes que vaya acorde a la problemática. Integrar todos los procesos de la guía con las fases del PTRB resulta en un proceso dinámico que facilita la toma de decisiones posteriores, basados en criterios claros de planeación y gestión de proyectos.

Por otro lado, para una correcta toma de decisión es importante involucrar dentro de la metodología de trabajo una parte exploratoria y la otra estratégica. Con la parte exploratoria se logra profundizar en la problemática o situación problema que se desea resolver con el plan. Esta parte exploratoria integra de igual manera el conocimiento a fondo de las necesidades tanto organizacionales como técnicas que impactan la productividad del proyecto. De igual manera se tienen en cuenta los problemas que pueden llegarse a presentar durante el desarrollo de este, a la hora de la implementación. Teniendo en cuenta estas eventualidades se puede tomar decisiones previas en caso de que ocurran. Al final, la parte diseño se desarrolla en el marco de lo hallado en la fase estratégica y la correcta toma de decisiones involucra como tal estos hallazgos, lo que permite que la realidad del plan este acorde con lo que se va a realizar.

Por la naturaleza del PTRB, este debe involucrar la utilización de tecnologías y herramientas de gran impacto tanto ambiental como económico y social. Es necesario evaluar el impacto ambiental ya que la renovación del balasto implica una serie de procesos técnicos y de remoción de material que pueden generar grandes contaminantes. De igual manera, se utiliza grandes cantidades de recursos que necesitan ser evaluados y por ende manejados de la manera más adecuada. Asimismo, es necesario evaluar el impacto económico por que los procesos a utilizar no son fáciles de realizar y se necesita maquinaria de grandes capacidades, que abarcan la inversión de mucho capital. Con el agravante que en Colombia el desarrollo tecnológico con respecto al tema ferroviario no se encuentra en una etapa de madurez comercial, técnica y financiera. De aquí especialmente se deriva la importancia de la prospectiva y gestión tecnológica de empresas. Con respecto al impacto social, el proceso de renovación comprende la creación de empleos y vacantes para la población alrededor del proyecto. Finalmente, en el desarrollo del presente capítulo un tema que tomó relevancia y potencialmente impactará la siguiente fase del proyecto, es el tema de sostenibilidad. Cómo hacer que el diseño del PTRB sea sostenible, es un reto que dentro de la gestión de proyectos está tomando fuerza.

REFERENCIAS

- [1] M. Petrović, V. Jenić y D. Kaužljjar, «The role of railway stations in increasing transport demand,» *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 111, pp. 249-260, 2010.
- [2] C. E. Nieto, «El ferrocarril en Colombia y la busqueda de un país,» *APUNTES*, vol. 24, n° 1, pp. 62-75, 2011.
- [3] G. Poveda, «El primer ferrocarril en Colombia,» *DYNA*, vol. 69, n° 137, pp. 61-73, 2002.
- [4] T. Abadi, L. Le Pen, A. Zervos y W. Powrie, «A Review and Evaluation of Ballast Settlement Models using Results from the Southampton Railway Testing Facility (SRTF),» *Procedia Engineering*, vol. 143, n° 2016, pp. 999-1006, 2016.
- [5] C. E. De Paiva, A. P. Buck y A. Ferreira, «Sub-ballast performance in Brazilian railway infrastructures,» *Construction and Building Materials*, vol. 190, n° 2018, p. 164-169, 2018.
- [6] P. Claisse y C. Calla, «Rail ballast: conclusions from a historical perspective,» *Proceedings of the ICE - Transport*, vol. 159, n° 2, pp. 69-74, 2012.
- [7] Y. Sun, C. Chen y S. Nimbalkar, «Identification of ballast grading for rail track,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, n° 2017, pp. 945-954, 2017.
- [8] Y. Guo, V. Markine, X. Zhang, W. Qiang y G. Jing, «Image analysis for morphology, theology and degradation study of railway ballast: A review,» *Transportation Geotechnics*, vol. 18, n° 2019, pp. 173-211, 2019.
- [9] Y. Qian, M. Dersch, Z. Gao y J. R. Edwards, «Railroad infrastructure 4.0: Development and application of an automatic ballast support condition assessment system,» *Transportation Geotechnics*, vol. 19, n° 2019, pp. 19-34, 2019.
- [10] J. Sadeghi, M. Motieyan, J. Zakeri, B. Yousefi y M. Mollazadeha, «Improvement of railway ballast maintenance approach, incorporating ballast geometry and fouling conditions,» *J. of Applied Geophysics*, vol. 151, n° 2018, p. 263-273, 2018.
- [11] Y. Guo, V. Markine, J. Song y G. Jing, «Ballast degradation: Effect of particle size and shape using Los Angeles Abrasion test and image analysis,» *Construction and Building Materials*, vol. 169, n° 2018, p. 414-424, 2018.

- [12] D. Navikas, H. Sivilevicius y M. Bulevicius, «Investigation and evaluation of railway ballast properties variation during technological processes,» *Construction and Building Materials*, vol. 185, nº 2018, p. 325–337, 2018.
- [13] M. Sol-Sánchez y G. D'Angelo, «Review of the design and maintenance technologies used to decelerate the deterioration of ballasted railway tracks,» *Construction and Building Materials*, vol. 157, nº 2017, p. 402–415, 2017.
- [14] S. Aingaran, L. Le Pen, A. Zervos y W. Powrie, «Modelling the effects of trafficking and tamping on scaled railway ballast in triaxial tests,» *Transportation Geotechnics*, vol. 15, nº 2018, pp. 84-89, 2018.
- [15] A. Abrashitov y A. Semak, «Experimental study of stoneblowing track surfacing technique,» *Procedia Engineering*, vol. 189, nº 2017, pp. 75-79, 2017.
- [16] M. L. Seba, M. D. Jérémie, G. L. Tsebo Simo y C. Simo, «Preventive Maintenance of Railway Tracks: Ballast Performance Anticipation in the Cameroon Railway,» *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 4, nº 5, pp. 398-406, 2012.
- [17] J. Varajão, R. Colomo-Palacios y H. Silva, «ISO 21500:2012 and PMBoK 5 processes in information systems project management,» *Computer Standards & Interfaces*, vol. 50, nº 2017, pp. 216-222, 2017.
- [18] X. Brioso, «Integrating ISO 21500 Guidance on Project Management, Lean Construction and PMBOK,» *Procedia Engineering*, vol. 123, nº 2015, pp. 76-84, 2015.
- [19] N. Porras Barajas, «Una mirada a la sostenibilidad en la gestión de proyectos,» *International Journal of Good Conscience*, vol. 12, nº 3, pp. 328-344, 2017.
- [20] S. Simson, F. L. y M. Murray, «Rail Track Maintenance Planning: An Assessment Model,» *Transportation Research Record 1713, Rail, Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1713, pp. 1-12, 2000.
- [21] H. Lam y M. Wong, «Railway Ballast Diagnose through Impact Hammer Test,» *Procedia Engineering*, vol. 14, nº 2011, p. 185–194, 2011.
- [22] K. Giannakos, L. Andreas y C. Plati, «Railway Ballast Requirements for High Speed and Heavy Haul Lines: Hardness, Fouling, Life Cycle,» 2nd International Conference on Transportation Geotechnics, Hokkaido, 2012.
- [23] D. Mishra, Y. Qian, H. Huang y E. Tutumluer, «An integrated approach to dynamic analysis of railroad track transitions behavior,» *Transportation Geotechnics*, vol. 1, nº 2014, p. 188–200, 2014.
- [24] H. Shang, «Maintenance Modelling, Simulation and Performance Assessment for Railway Asset Management,» *Troyes*, 2015.
- [25] T. Lidén, «Railway infrastructure maintenance - a survey of planning problems and conducted research,» *Transportation Research Procedia*, vol. 10, nº 2015, p. 574–583, 2015.
- [26] V. Fontserè, A. López Pita, N. Manzo y A. Antonio, «NEOBALLAST: new high-performance and long-lasting ballast for sustainable railway infrastructures,» *Transportation Research Procedia*, vol. 14, nº 2016, p. 1847 – 1854, 2016.
- [27] E. Mahmoud, A. Papagiannakis y D. Renteria, «Discrete Element Analysis of Railway Ballast under Cycling Loading,» *Procedia Engineering*, vol. 143, nº 2016, pp. 1068-1076, 2016.
- [28] D. Milne, L. Le Pen, G. Watson, D. Thompson, W. Powrie, M. Hayward y S. Morley, «Monitoring and repair of isolated trackbed defects on a ballasted railway,» *Transportation Geotechnics*, vol. 17, nº 2018, pp. 61-68, 2018.
- [29] N. Perrier, S.-E. Benbrahim y R. Pellerin, «The core processes of project control: A network analysis,» *Procedia Computer Science*, vol. 138, nº 2018, pp. 697-704, 2018.
- [30] Project Management Institute, Inc., *La guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK)*, Sexta ed., I. Project Management Institute, Ed., Chicago, IL, 2017.
- [31] M. Vanhoucke, «Tolerance limits for project control: An overview of different approaches,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 127, nº May 2018, p. 467–479, 2019.
- [32] T. Marier-Bienvenue, R. Pellerin y L. Cassivi, «Project Planning and Control in Social and Solidarity Economy Organizations: A Literature Review,» *Procedia Computer Science 121*, vol. 2017, nº 2017, p. 692–698, 2017.
- [33] M. Ghobakhloo, T. Sai-Hong, M. Sadeg-Sabouri y N. Zulkifli, «Strategies for Successful Information Technology Adoption in Small and Medium-sized Enterprises,» *Information*, vol. 3, nº 2012, pp. 36-67, 2012.
- [34] R. Minotta y J. Mosquera, «Guía Metodológica para la planeación tecnológica en una empresa apoyada en la relación universidad empresa,» Universidad del Valle: Facultad de Ingeniería, Santiago de Cali, 2011.
- [35] A. J. G. Silvius y R. Schipper, «Social and Sustainability in the Business Case,» *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 00, nº 2012, pp. 1-12, 2012.
- [36] V. Simionescu y G. Silvius, «Assessing Sustainability of Railway Modernization Projects; A Case Study from Romania,» *Procedia - Procedia Computer Science*, vol. 100, nº 2016, p. 458–465, 2016.
- [37] S. Malekpour, R. R. Brown, F. J. De Haan y T. H. Wong, «Preparing for disruptions: A diagnostic strategic planning intervention for sustainable development,» *Cities*, vol. 63, nº 2017, p. 58–69, 2017.
- [38] Z. Papulova y A. Gazova, «Role of Strategic Analysis in Strategic Decision-Making,» *Procedia Economics and Finance*, vol. 39, nº 2016, pp. 571-579, 2016.
- [39] M. Menéndez, C. Martínez, G. Sanz y J. M. Benitez, «Development of a smart framework based on knowledge to support infrastructure maintenance decisions in railway corridors,» *Transportation Research Procedia*, vol. 14, nº 2016, pp. 1987-1995, 2016.
- [40] P. Chemweno, L. Pintelon, P. N. Muchiri y A. Van Horenbeek, «Risk assessment methodologies in maintenance decision making: A review of dependability modelling approaches,» *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 173, nº 2018, pp. 64-77, 2018.
- [41] X. Zhang, J. Kang y T. Jin, «Degradation Modeling and Maintenance Decisions Based on Bayesian Belief Networks,» *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 63, nº 2, pp. 620-633, 2014.
- [42] M. Compare y E. Zio, «Genetic Algorithms in the Framework of Dempster-Shafer Theory of Evidence for Maintenance Optimization Problems,» *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 64, nº 2, pp. 645-660, 2015.
- [43] E. Krawczyk-Dembicka, «Analysis of Technology Management Using the Example of the Production Enterprise from the SME Sector,» *Procedia Engineering*, vol. 182, nº 2017, pp. 359-365, 2017.
- [44] U. Aysun y Z. Kabukcuoglu, «Interest rates, R&D investment and the distortionary effects of R&D incentives,» *European Economic Review*, vol. 111, nº 2019, pp. 191-210, 2019.
- [45] J. Wonglimpiyarat, «What is it about strategic implications of using financial models in the process of technology management?,» *Journal of High Technology Management Research*, nº org/10.1016/j.hitech.2018.12.001, 2018.

- [46] D. Cetindamar, R. Phaalb y D. Probertb, «Technology management as a profession and the challenges ahead,» *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 41, n° 2016, pp. 1-13, 2016.
- [47] J. Medcof, «Leadership development: Towards a more systematic approach in technology management,» *Journal of High Technology Management Research*, vol. 28, n° 2017, pp. 167-178, 2017.
- [48] J. Lee, C. Kim y J. Shin, «Technology opportunity discovery to R&D planning: Key technological performance analysis,» *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 119, n° 2017, pp. 53-63, 2017.
- [49] H. Noh, J.-H. Seo, H. Sun Yoo y S. Lee, «How to improve a technology evaluation model: A data-driven approach,» *Technovation*, vol. 72-73, n° 2018, pp. 1-12, 2018.
- [50] M. Haschke, J. Ahmadian, L. Zeidler y T. Hubrig, «In-Situ Recovery of Critical Technology Elements,» *Procedia Engineering*, vol. 138, n° 2016, p. 248 - 257, 2016.
- [51] S. Baykara, «Hydrogen as fuel: a critical technology?,» *Intern. J. of Hydrogen Energy*, vol. 30, n° 2005, p. 545 - 553, 2005.
- [52] C. Wagner y S. Popper, «Identifying Critical Technologies in the United States: a Review of the Federal Effort,» *Journal of Forecasting*, vol. 22, pp. 113-128, 2003.
- [53] J.-P. Bootz, P. Durance y R. Monti, «Foresight and knowledge management. New developments in theory and practice,» *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 140, n° 2019, pp. 80-83, 2019.
- [54] L. Nogueira, P. Rodriguez, J. Portugal-Pereira, B. Hoffmann, R. Aragao, R. Milani, A. De Lucena, A. Szklo y R. Schaeffer, «Critical technologies for sustainable energy development in Brazil: technological foresight based on scenario modelling,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 130, n° 2016, pp. 12-24, 2016.
- [55] P. Rikkonen y P. Tapio, «Future prospects of alternative agro-based bioenergy use in Finland—Constructing scenarios with quantitative and qualitative Delphi data,» *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 76, n° 2009, p. 978990, 2009.
- [56] J. M. F. Da Silveira, M. Dal Poz, L. A. De Souza y I. Huamani, «Chapter 8 - Technological Foresight of the Bioethanol Case,» de *Global Bioethanol*, S. L. Monteiro Salles-Filho, L. A. Barbosa Cortez, J. M. T. S. C. Ferreira Jardim da Silveira y M. d. G. Derengowski Fonseca, Edits., Academic Press, 2016, pp. 181-196.
- [57] C. Battistella y A. F. De Toni, «A methodology of technological foresight: A proposal and field study,» *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 78, n° 2011, pp. 1029-1048, 2011.
- [58] J.-M. Réveillac, «Optimization Tools for Logistics,» de *12 - Scheduling and Planning with a Project Manager*, Réveillac, Jean-Michel, 2015, pp. 335-364.

Localización automática de vehículos de transporte escolar y monitoreo y control de ingreso y salida de estudiantes mediante la integración de tecnologías GPRS, GPS, Arduino y RFID

Félix R. Gómez D.¹

Edgar F. Rodríguez V.²

Guillermo F. Valencia P.³

Universitaria Agustiniiana Uniagustiniana – Colombia

Este escrito presenta los resultados del proyecto de investigación denominado “Diseño de prototipo para localización automática, información geográfica, monitoreo y control del transporte escolar”, el cual fue desarrollado a partir de la pregunta de investigación ¿Cómo monitorear y controlar el ingreso y salida de estudiantes de vehículos de transporte escolar mediante el uso de tecnologías GPRS, GPS, Arduino y RFID? Además de resolver la pregunta de investigación, el resultado del proyecto proporcionará una valiosa fuente de información sobre la movilidad de los estudiantes y el comportamiento del sistema de transporte escolar en Bogotá, con lo cual las instituciones educativas podrán mejorar la seguridad y eficiencia del mismo.

1. INTRODUCCIÓN

En junio de 2013, medios de comunicación mexicanos informaban la triste noticia de la muerte de una niña de tres años al ser olvidada dentro de la ruta que la llevaba a la guardería La Casita del Sol, en Chicoloapan, México [1]. De forma similar en mayo de 2015, los noticieros y diarios de Colombia informaban acerca del olvido de una niña de cuatro años, estudiante del jardín Los Sauces de la localidad de Suba, en Bogotá, dentro del vehículo que la transportaba al colegio [2]. Si bien este hecho no terminó en tragedia, sí encendió las alarmas sobre las fallas de seguridad de este sistema de transporte. En septiembre del año 2016, los medios de comunicación daban a conocer la penosa noticia de la muerte de una niña de cuatro años, del grado pre-kínder del colegio británico, en Cartagena [3], quien, según lo afirmado por Medicina Legal, falleció por asfixia dentro de una ruta escolar. En octubre del mismo año, se dio la noticia de la muerte de otra menor, de cuatro años, que se quedó dormida en el transporte que la llevaba al colegio Claret, en Cali, por circunstancias similares [4]. Estos hechos pudieron haber sido evitados, si se hubiera verificado con certeza que todos los niños habían bajado de los vehículos que los transportaban, al llegar al colegio.

Los hechos ocurridos en Colombia se dieron a pesar de la existencia del Decreto 348 del 25 de febrero de 2015 del Ministerio de Transporte [5], que obliga a que las rutas escolares cuenten con un sistema de vigilancia asistido satelitalmente y cámaras de video al interior de los vehículos, a fin de que padres de familia e instituciones educativas puedan conocer con exactitud la ubicación de la ruta que transporta a los menores y situaciones particulares dentro de los automotores.

Esta investigación fundamentada a partir de la pregunta: ¿Cómo monitorear y controlar el ingreso y salida de estudiantes de vehículos de transporte escolar mediante el uso de tecnologías GPRS, GPS, Arduino y RFID?, pretende resolver un problema social que afecta no sólo en el ámbito local sino internacional. De hecho, en Colombia ninguna empresa pública o privada cuenta con un dispositivo de validación para el control y administración del ingreso y salida de los estudiantes a los vehículos de las rutas escolares.

La investigación toma como referencia, en primer lugar, los avances en el desarrollo de sistemas automáticos de localización vehicular (AVL por su sigla en inglés), que consisten en dispositivos que permiten ubicar de forma inequívoca vehículos automotores, mediante el procesamiento digital de señales recibidas de una serie de sensores ubicados de forma estratégica en conjunción con la información de latitud, longitud, rumbo, altitud y velocidad, recibida desde la constelación de satélites del sistema de navegación satelital Navstar-GPS y, en segundo lugar, las innovaciones pertinentes en los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID por su sigla en inglés).

El trabajo de investigación se centra en demostrar que es posible desarrollar un prototipo, con apoyo en tecnología GPRS, Navstar-GPS, Arduino y RFID, que permita realizar un seguimiento a los vehículos de transporte escolar, en tiempo real, incluyendo el envío y recepción de datos relacionados con el ingreso de los estudiantes al automotor y su salida, todo lo anterior usando telemetría. La investigación se enmarca en el proyecto: “Prototipo para localización automática, información geográfica, monitoreo y control del transporte escolar”, que se presentó y desarrolló dentro de la convocatoria interna de proyectos de investigación de la Universitaria Agustiniiana.

El producto final consiste en un sistema que integra dispositivos sensores RFID incorporados en los vehículos escolares, repositorios de la información a sensar, bases de datos con la información a ser consultada y herramientas de gestión WEB de todo el sistema. A partir de esta integración, el sistema proporcionará mejoras en relación con: manejo de horarios para iniciar operaciones de movilización y entregas de los estudiantes a sus destinos finales,

¹ felix.gomez@uniagustiniana.edu.co

² edgar.rodriguez@uniagustiniana.edu.co

³ guillermo.valenciap@uniagustiniana.edu.co

información de la movilidad de los estudiantes en tiempo real, seguridad de los vehículos escolares, tiempos de respuesta en accidentes y emergencias, auditoría a la operación del sistema de transporte escolar, entre otros.

El presente capítulo inicia con la exposición de la metodología que se utilizó para el desarrollo de la investigación, seguida de la explicación pormenorizada de la misma; continúa con una disertación sobre las teorías que fundamentan la investigación y las técnicas experimentales utilizadas en la construcción del dispositivo y termina con la presentación de conclusiones pertinentes y provisionarias respecto a la investigación.

2. MÉTODO

El problema de investigación, que se enfoca en resolver la pregunta ¿Cómo monitorear y controlar el ingreso y salida de estudiantes de vehículos de transporte escolar mediante el uso de tecnologías GPRS, GPS, Arduino y RFID?, se orienta específicamente al transporte escolar de los colegios agustinianos en Bogotá y se aborda desde una metodología exploratoria-descriptiva, de tipo experimental [6]. Se inicia con la búsqueda de fuentes primarias de información concernientes a sistemas de localización vehicular AVL, telemetría, tecnología Arduino, tecnología de identificación por radiofrecuencia y sistemas de posicionamiento global, base teórica necesaria para la comprensión del objeto de investigación y el diseño del prototipo.

En el diseño del dispositivo se utiliza una metodología de tipo proyectiva, que en palabras de Hurtado [7] “consiste en la elaboración de una propuesta o de un modelo, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, o de una institución, en un área particular del conocimiento, a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y las tendencias futuras”.

Finalmente, para la construcción y pruebas de funcionamiento del dispositivo diseñado, se emplea un grado de abstracción de investigación aplicada, cuyo principal objetivo es resolver una situación problémica de la forma más práctica posible.

2.1 Telemetría

Si bien el término telemetría, acuñado desde la antigüedad, hace referencia a medición de distancias, es a partir de la primera mitad del siglo XX que empieza a utilizarse como se conoce hoy en día [8]. Gracias a la telemetría es posible obtener de forma remota la medida de casi cualquier magnitud física que sea medible. En el caso de la telemetría vehicular, uno de sus principales usos ha sido en competencias automovilísticas, en las cuales es necesario conocer en tiempo real, rendimiento del motor, eficiencia aerodinámica, presión del aceite, adherencia de los neumáticos, desgaste de los frenos, entre otros.

No obstante, estas particularidades del uso de la telemetría existen otras posibilidades que quizá sólo se han venido explorando, a partir del siglo XXI. Una de estas posibilidades es poder recibir en tiempo real la información proveniente de un sistema de sensores utilizados con propósitos específicos, tales como el registro de paso a través de una talanquera, que bien puede ser ubicada al interior de un vehículo de transporte escolar.

La telemetría, como tecnología permite la medición remota y notificación de información de interés para el operador de un sistema. En palabras de Barculo [9] “La telemetría normalmente se refiere a las comunicaciones inalámbricas, pero también puede referirse a los datos transferidos a través de otros medios, como un teléfono o una red informática o a través de un enlace óptico”.

La información transmitida desde un satélite, relacionada con el funcionamiento de sus sistemas e instrumentos, también se conoce como Telemetría. Las funciones de telemetría satelital permiten la comunicación de datos entre estaciones terrenas y los satélites. Por otro lado, la información transmitida hacia el satélite, desde la estación terrena, se suele llamar Telecomando e incluye datos y parámetros de configuración que permiten cambiar el estado de los subsistemas satelitales. En cualquiera de los casos, Telemetría o Telecomando, el elemento clave del sistema es un buen sistema de antenas diseñadas con precisión desde el punto de vista eléctrico, mecánico y térmico [10].

Si bien la telemetría se puede utilizar para muchos fines, una de sus aplicaciones más importante se centra en coadyuvar a algunos sistemas en la localización vehicular. Existen distintos desarrollos en localización vehicular, por ejemplo, Sagues [11] plantea que la localización de vehículos en parqueaderos implica diversos problemas a resolver, en especial si se trata de áreas amplias. En este caso, se requeriría disponer de una gran cantidad de sensores estáticos, hecho que puede ser resuelto mediante la utilización de robots que se coordinen para la misión de localizar un vehículo, reduciendo el tiempo de búsqueda y la necesidad de ubicar gran cantidad de sensores estáticos en todo el entorno. Por otro lado, Tarco [12] deja de lado el problema de la localización en interiores y se enfoca en un diseño simple que permita identificar la posición exacta de un vehículo desde un centro de despacho, utilizando para ello, un sistema de radiofrecuencia integrado a un sistema de posicionamiento global. El sistema utiliza antenas tipo dipolo, radio transeptores y software de monitoreo.

Existen cientos de desarrollos enfocados en la telemetría de localización vehicular; no obstante, patentes reconocidas por la oficina de Patentes de los Estados Unidos [13] no son muchas, y las que hay se enfocan en resolver problemáticas distintas a las tratadas dentro de esta investigación. A partir de la revisión de las patentes y solicitudes de patente, ha sido posible establecer que no existe un artefacto que reúna los requerimientos del objeto de estudio abordado en este proyecto. Las patentes concedidas o las solicitudes presentadas se pueden clasificar en ocho ítems principales: comunicación de datos entre vehículos y terminales remotos, control de vehículos dados a un tercero, programación de destinos remotos para la navegación de vehículos, control remoto de las operaciones de vehículos, interacción con vehículos a través de una red móvil de radiotelefonía, control remoto de la localización de vehículos, monitorización de vehículos, localización de vehículos de transporte y carga.

La Tabla 1 muestra la síntesis de las patentes concedidas o solicitudes presentadas, en relación con el tema objeto de estudio, y a continuación se presenta el detalle de cada una de las patentes (<https://www.google.com/patents/>).

Tabla 1. Patentes y solicitudes de patente relacionadas con sistemas de localización, control o monitoreo vehicular

Título	Patentes o solicitudes
Method for data communication between a vehicle and a remote terminal	US20050016787
	US20080218323
	CA2391155
	EP1299265
	US7040435
	US7280898
	US7434643
	US20050016787
	US20060213731
	US20080218323
WO2001036234	
Method and system for controlling a vehicle given to a third party	US7812712
	US7956730
	US20070200663
	US20100152976
Remote destination programming for vehicle navigation	US8014942
	US20080195306
	US8014942
Method and system for remotely monitoring the operations of a vehicle	US20080197992
	US7880599
	US20080211641
Method and system for interacting with a vehicle over a mobile radiotelephone network	US7936256
	US8253549
	US8547212
	US9084197
	US20080211641
	US20110148658
	US20120289295
US20140066135	
Method and system for remotely monitoring the location of a vehicle	US8269618
	US20110102189
Vehicle monitoring system including automatic preselection of desired satellite receiver	US3718899
Cellular phone based automatic emergency vessel/vehicle location system	US5555286 WO1998006229
Security for transport vehicles and cargo	US5969595

2.2 Patentes concedidas o solicitudes presentadas

- *Cellular phone based automatic emergency vessel/vehicle location system.* Corresponde a la publicación US5555286 A, que trata sobre un sistema de localización de vehículos convencionales o vehículos de emergencia con apoyo en la telefonía celular. De acuerdo con la oficina de patentes, incluye una unidad de navegación para determinar la posición del vehículo una unidad de voz que permite enviar mensajes de emergencia. Algunas características adicionales, incluyen botón de pánico, sensor de lojack, alarma de robo, despliegue de airbag y otras formas de activación remota. El proceso se realiza mediante tonos DTMF configurados en el terminal celular [14].
- *System for integrating a cellular telephone with a vehicle security system.* Corresponde a la publicación US 5081667 A, que trata sobre un sistema de interfaz que permite integrar sistemas de comunicación celular con los sistemas de seguridad de vehículos. De acuerdo con la oficina de patentes, el sistema incluye un controlador y una interconexión que permite sincronizar el teléfono celular con el controlador. Incluye el hardware y el software necesarios para conectar los sistemas de seguridad del vehículo al controlador y para interconectar el controlador al vehículo [15].
- *Method of and apparatus for utilizing geographically spread cellular radio networks to supplement more geographically limited stolen vehicle recovery radio networks in activation of radio tracking and recovery of such*

vehicles. Corresponde a la publicación US 7536169 B2, que trata sobre la ampliación de la capacidad de activación y seguimiento de las redes de radiofrecuencia dedicadas a la recuperación de vehículos robados, mediante el uso de sistemas telefónicos inalámbricos [16].

- *Technique for operating a vehicle safely in a lane*. Corresponde a la publicación US 7656310 B2, que trata sobre un sistema de control y gestión para automóviles, que permite conectar mediante un procesador central, varios subsistemas del vehículo usualmente no relacionados entre sí, con el objeto de realizar funciones sinérgicas tales como conducción inteligente, aparcamiento automático, etc. El sistema emplea una interfaz que ayuda al controlador a administrar las funciones del vehículo [17].
- *Technique for operating a vehicle effectively and safely*. Corresponde a la publicación US 7902969 B2, que trata sobre un sistema de control en un vehículo que ayuda al conductor en la conducción segura y eficaz. De acuerdo con la oficina de patentes, el sistema proporciona asistencia de conducción al usuario teniendo en cuenta la condición física del conductor, la condición del vehículo y las condiciones del entorno. Las condiciones circundantes incluyen, por ejemplo, condiciones de carretera, tiempo y tráfico, externas al vehículo. La condición del vehículo se refiere a las condiciones de los frenos, la dirección, los neumáticos, el radiador, etc. La condición física del conductor hace referencia a los signos de fatiga, estrés y enfermedad, que son monitoreados por el sistema de control para evaluar situaciones de riesgo presentes al momento de conducir [18].
- *Remote destination programming for vehicle navigation*. Corresponde a la publicación US 8014942 B2, que trata sobre un sistema que permite al usuario definir un destino deseado antes de un viaje, mediante programación remota. De acuerdo con la oficina de patentes, el sistema permite que el destino pueda almacenarse en un servidor de navegación remoto, según el perfil del usuario. El sistema opera con ayuda de una interfaz web y sistemas de comunicaciones inalámbricas. El sistema incluye la posibilidad de ayudar a localizar la ubicación deseada sin necesidad de intervención del usuario ni equipos separados de navegación a bordo [19].
- *Method of and apparatus for utilizing geographically spread cellular radio networks to supplement more geographically limited stolen vehicle recovery networks in activation of radio tracking and recovery of such vehicles*. Corresponde a la publicación US 8086215 B2, que hace referencia a un método para ampliar la capacidad de activación y seguimiento de un número limitado de redes de radiofrecuencia dedicadas de recuperación de vehículos robados, activadas desde un centro de control tras la notificación del robo del vehículo. El método, de acuerdo con la oficina de patentes, incluye complementariamente el uso de redes de teléfonos celulares. Mediante este método, es posible obtener la ubicación aproximada del vehículo robado y hacer su seguimiento hasta lograr su recuperación [20].
- *Secure cargo transportation system*. Corresponde a la publicación US 7777608 B2, que trata sobre un dispositivo de comunicaciones inalámbricas que comprende una unidad de procesamiento y un subsistema de determinación de localización que se acopla a la unidad y permite determinar la ubicación actual del dispositivo de comunicaciones inalámbricas, haciendo uso del sistema de posicionamiento global (GPS). De acuerdo con la oficina de patentes, el sistema incluye dos subsistemas de comunicaciones inalámbricas, el primero se utiliza para suministrar información de ubicación, utilizando un sistema de comunicaciones celulares y el segundo, permite modular una radiofrecuencia proporcionada por un interrogador remoto, para proporcionar de forma inalámbrica un número aleatorio generado en el dispositivo de comunicaciones inalámbrico como un identificador unívoco del dispositivo [21].

3. RESULTADOS

El diseño del prototipo se propuso a partir de fases de desarrollo, entre las cuales se consideraron: Definición de la arquitectura del sistema, diseño y prueba de software de control, diseño de módulo de localización automática de vehículos, diseño de módulo de control de ingreso y salida de estudiantes, diseño de módulo de comunicación con el servidor central, estudio de reportes y documentación.

3.1 Arquitectura del sistema

Con respecto a la definición de la arquitectura del sistema, la Figura 1 ilustra el concepto abordado en el marco de la investigación para el diseño y desarrollo del prototipo.

3.2 Módulo de localización automática de vehículos

En cuanto al desarrollo del módulo de localización automática de vehículos, mediante el uso de equipos facilitados por parte del programa de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universitaria Agustiniense se desarrolló el prototipo de telemetría y la programación y configuración del dispositivo AVL y de los diferentes sensores. Como resultado, se obtuvieron las primeras pruebas de posicionamiento y monitoreo, las cuales se presentan en la Figura 2.

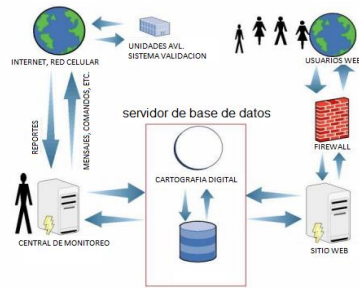


Figura 1. Arquitectura del sistema

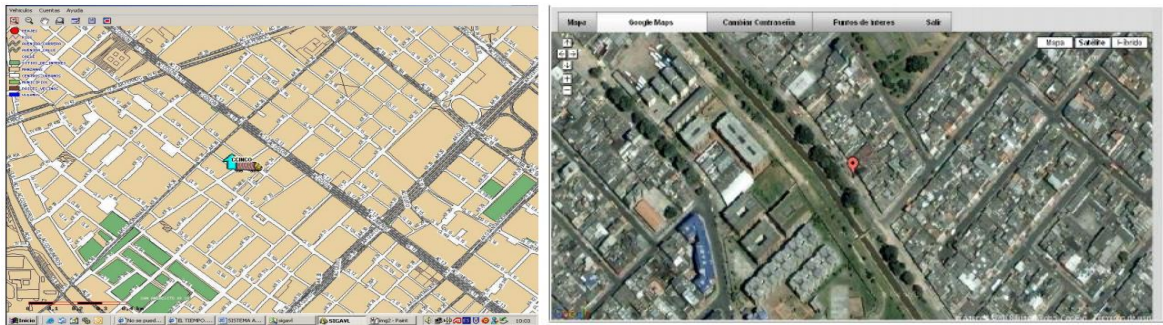


Figura 2. Primeras pruebas del sistema de rastreo vehicular

3.3 Módulo de control de ingreso y salida de estudiantes

Con respecto al desarrollo del módulo de control de ingreso y salida de estudiantes al vehículo, se realizó la configuración y programación de la tarjeta Arduino, la configuración y programación del módulo RFID y la configuración y programación de la pantalla táctil. Como resultado, se lograron las primeras pruebas de validación y detección de las tarjetas RFID, las cuales se presentan en forma ilustrativa en la Figura 3.

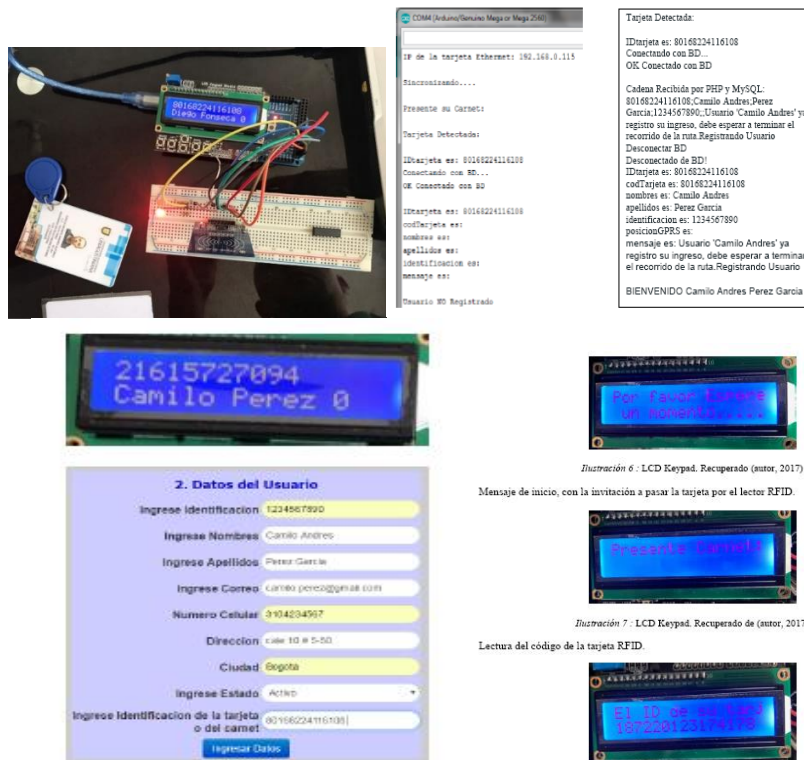


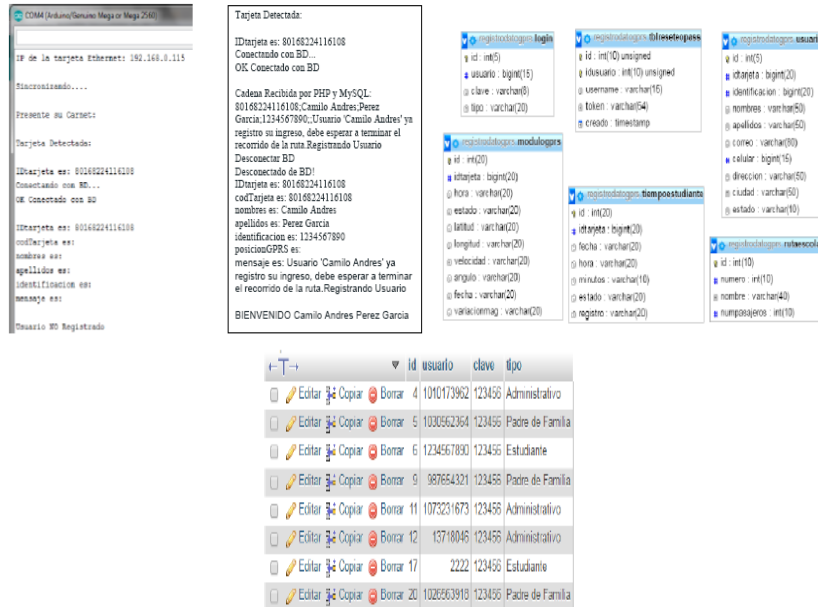
Figura 3. Primeras pruebas de validación y detección de las tarjetas RFID

3.4 Módulo de comunicación con el servidor central

En lo que concierne al desarrollo del módulo de comunicación con el servidor o central de comunicación, se adquiere el dispositivo SIM900, el cual se configura y programa para permitir enviar los datos obtenidos por telemetría al servidor, mediante el uso de la red móvil celular de los operadores legalmente establecidos en Colombia. Como resultado, se logró el envío de datos al servidor.

3.5 Módulos de consulta e ingreso de información

Una vez terminada esta fase, se procedió con la segunda etapa del proyecto, la cual se centró en desarrollar el módulo administrador y el módulo web de consulta para el personal autorizado. En cuanto al desarrollo del módulo administrador, se realizó la configuración de la base de datos para incluir los diferentes registros, dando como resultado, la recepción de datos provenientes del módulo de control de ingreso y salida de estudiantes, lo cual se ilustra en la Figura 4.



Finalmente, en lo que atañe al desarrollo del módulo web de consulta para el personal autorizado, se realiza el diseño de la página web para consulta de reportes, con lo cual da inicio al trabajo de grado de algunos estudiantes del programa de Tecnología en Desarrollo de Software de la Universitaria Agustiniiana. Como resultado, se obtiene la primera fase de la página web para realizar consultas de los diferentes tipos de usuarios, lo cual se presenta en forma gráfica en la Figura 5.



Como resultado de la investigación, se desarrolla un prototipo que integra las tecnologías GPRS, GPS, Arduino y RFID y, permite, mediante el uso de redes móviles, obtener información en tiempo real y localizar automáticamente vehículos de transporte escolar, así como, monitorear y controlar el ingreso y salida de estudiantes de estos vehículos. En la Figura 6 se ilustra el diagrama de bloques del prototipo diseñado.

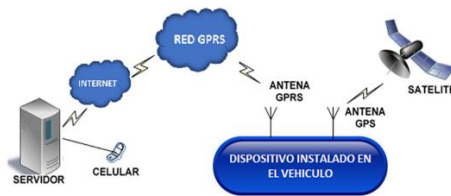


Figura 6. Diagrama de bloques del sistema

El sistema está compuesto por los siguientes módulos:

- *Módulo administrador*, que es el encargado de controlar y generar todos los reportes y dar autorización a los estudiantes y padres de familia para que puedan realizar las consultas desde la página web, controlar el apagado y encendido del vehículo desde internet, bien sea desde un PC o un celular, generar reporte de exceso de velocidad, kilómetros recorridos y paradas en sitios no autorizados. El módulo cuenta además con botón de pánico, micrófono en la cabina del vehículo, reporte de estado de la puerta, reporte de desconexión de batería principal y antena GPS y servicio exclusivo de mapas.
- *Módulo estudiante*, en el cual se encuentra toda la información pertinente al estudiante: nombres completos, dirección de residencia, número de contacto, nombres de los padres, sitios de interés y código.
- *Módulo padre de familia*, habilitado para los padres de familia que tienen la autorización por parte del administrador para realizar las consultas o reportes de ingreso y salida de los estudiantes a los vehículos de transporte escolar. Cuenta además con un sistema de alarma que indica si el estudiante es recogido o no en la puerta de su casa y entregado en la puerta del colegio, atrasos en la ruta por diversas causas (congestiones en las vías, averías vehiculares, cambios de buses, cambios de rutas) y ubicación geográfica en tiempo real.
- *Módulo Web de Consulta*, permite que los vehículos sean mostrados sobre cartografía digital en tiempo real, la cual se encuentra alojada en un servidor de base de datos, permitiendo que pueda ser utilizado como un repositorio para Sistemas de Información Geográfica. Los mapas se almacenan digitalmente con alguno de los formatos de información espacial SIG, tales como ArcView, MapInfo o GRASS. La visualización utiliza iconografía que incluye calles y carreras y, permite que los vehículos sean monitoreados online.
- *Módulo de control de ingreso y salida de estudiantes de los vehículos de transporte escolar*, es el encargado de recolectar los datos de las diferentes variables como: ingreso y salida del estudiante al vehículo, excesos de velocidad y puntos de parada del recorrido, que posteriormente serán enviados a la central de monitoreo (servidor) en una trama UDP/TCP, estos se encuentran instalados en cada vehículo. Estas tramas UDP son enviadas a través de un sistema de comunicación GPRS el cual permite transportar todos los datos por la red de comunicación móvil celular. Una vez enviadas las tramas UDP/TCP al centro de control (servidor), los datos son procesados y transformados en dirección, ciudad, municipio y otras variables que se convertirán en un banco de información al servicio de la institución académica. La Figura 7 ilustra el diagrama de bloques del dispositivo.

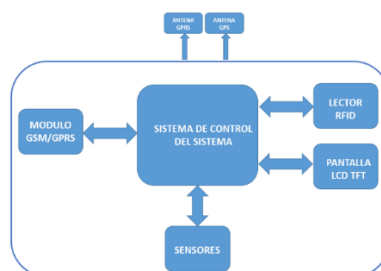


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema

El sistema de control está basado en una placa Arduino Mega que se encarga de recolectar toda la información proveniente de los sensores y demás dispositivos, tales como el sistema lector RFID, el cual está diseñado para leer los datos de las tarjetas de cada estudiante. El administrador de la central de monitoreo previamente ha cargado la base de datos con toda la información necesaria del estudiante: nombre, dirección de residencia, número telefónico de contacto, nombre del acudiente y puntos de control de ingreso y salida del estudiante. Una vez que el sistema RFID lee la tarjeta del estudiante hace una validación con el servidor y si está creado, envía una autorización de ingreso, mediante un mensaje de texto a la placa Arduino que, posteriormente es visualizado en la pantalla TFT. Si el estudiante no ha sido creado en la base de datos, el sistema RFID envía el mensaje de "usuario no registrado" y, por ende, el sistema de control no autoriza el ingreso del estudiante al vehículo de transporte escolar. Una vez que el sistema ha validado el ingreso o salida del estudiante, queda registrado en la base de datos con la posición del GPS y la hora de

ingreso que posteriormente podrá ser consultada en un histórico de ruta por parte del administrador o el padre de familia. En la Figura 8 se presentan resultados in situ del módulo de control de ingreso y salida de estudiantes.



Figura 8. Módulo de control de ingreso y salida de estudiantes

En la construcción del dispositivo resulta necesario considerar ciertos elementos como son la interfaz de comunicación, el protocolo de comunicación, la disponibilidad en el mercado y, por supuesto, la homologación para su uso en el territorio colombiano. En caso de no cumplirse este último requisito, el dispositivo jamás podría conectarse a las redes de los operadores móviles en Colombia y, por ende, no podría enviar datos al servidor. A fin de lograr este objetivo, fundamental dentro de la investigación, se seleccionó el módulo GSM/GPRS A6 SHIELD, el cual consiste en un módulo de función GSM / GPRS, compatible con cuatro bandas de operación del sistema GSM / GPRS, a saber, 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz y 1900 MHz; además, permite compatibilidad con llamadas de voz, mensajes SMS y servicio de datos GPRS. El módulo puede ser controlado mediante comandos AT a través de UART y admite niveles lógicos de 3.3V y 4.2V. La Figura 9 presenta imágenes del módulo GSM/GPRS A6 SHIELD.



Figura 9. Módulo GSM/GPRS A6 SHIELD

La comunicación entre el módulo GSM/GPRS y el microcontrolador es bidireccional, se realiza por medio de una interfaz serial RS232 a tres hilos, utilizando comandos AT y configurando el puerto serial 1 del microcontrolador a 9600bps 8, N, 1. En la Figura 10 se ilustra el diagrama del circuito de comunicación entre el módulo y el microcontrolador.

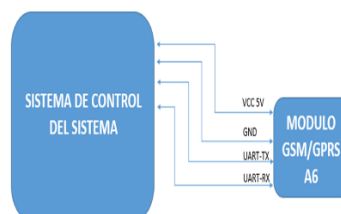


Figura 10. Diagrama del circuito de comunicación del Módulo GSM/GPRS A6 SHIELD

La selección del módulo de localización vehicular resulta esencial en el desarrollo del dispositivo. Como resultado de la investigación adelantada entorno a las patentes concedidas o solicitudes presentadas, en relación con el tema objeto de estudio, se seleccionó el Módulo GPS Tracker TK103 para los sensores. Este módulo consiste en un sistema de Localización Vehicular Automatizada (AVL) que se aplica a los sistemas de localización remota en tiempo real, con base en el uso de señales GPS y compatibilidad con GSM, Bluetooth y WiFi. La Figura 11 presenta imágenes del sistema GPS Tracker TK103.



Figura 11. GPS Tracker TK103

La comunicación entre el módulo GPS Tracker TK103 y el sistema de sensores se realiza por medio de una interfaz serial que permite el transporte de la información digital de cada sensor mediante tramas UDP/TCP similares a las del módulo GSM/GPRS A6. En la Figura 12 se ilustra el diagrama del circuito de comunicación entre el módulo GPS Tracker TK103 y el sistema de sensores.

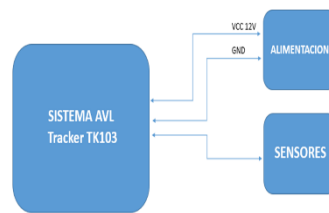


Figura 12. GPS Tracker TK103

A fin de constatar que es posible la integración de las tecnologías GPRS, GPS, Arduino y RFID en un dispositivo que permita la localización automática de vehículos de transporte escolar, así como el monitoreo y control de ingreso y salida de estudiantes de estos vehículos, se realizan pruebas in situ que permiten determinar su viabilidad. La Figura 13 presenta imágenes del dispositivo diseñado.



Figura 13. Prototipo para localización automática, información geográfica, monitoreo y control del transporte escolar

4. CONCLUSIONES

Existe un número plural de solicitudes de patentes y, patentes concedidas, relacionadas con sistemas de localización vehicular. No obstante, ninguna de las consultadas reúne los alcances logrados con el desarrollo del proyecto de investigación, en cuanto a permitir monitorear no sólo dónde se encuentra el vehículo escolar, sino, además, poder determinar, en tiempo real, si han ingresado todos los estudiantes al vehículo del cual hacen uso, o si aún quedan estudiantes dentro del vehículo cuando esta situación no debería presentarse.

Aunque el núcleo central del proyecto, es decir, el módulo de control de ingreso y salida de estudiantes al vehículo de transporte escolar se soporta en el uso de tecnologías RFID de contacto, tomando en cuenta que la normativa colombiana exige la presencia de un auxiliar en el vehículo, es posible desarrollar, en una segunda fase, una versión mejorada mediante el uso de tecnología RFID sin contacto, lo que daría una mayor autonomía al sistema.

Los avances en el desarrollo de la tecnología Arduino han permitido la conectividad, casi sin inconveniente, de todos los módulos que constituyen el dispositivo de localización automática de vehículos de transporte escolar, monitoreo y control de ingreso y salida de estudiantes, diseñado.

Los resultados de la investigación permiten inferir que el uso del dispositivo de localización automática de vehículos de transporte escolar, monitoreo y control de ingreso y salida de estudiantes diseñado, permitirá subsanar de forma óptima una dificultad claramente identificada en el sistema de transporte escolar, tanto en el ámbito nacional como en el internacional y coadyuvará con la función sustantiva de proyección social que les corresponde a las instituciones de educación superior.

REFERENCIAS

- [1] H. Baena, "Familiares acusan a director de estancia infantil," *Grupo milenio*, junio 25, 2013. [Online], Available: http://www.milenio.com/policia/Acusan-familiares-director-estancia-infantil_0_104989566.html [Accessed enero 13, 2019]
- [2] Revista Semana, "¿Qué pasó con Valentina, la niña que se quedó encerrada en un bus?," *Revista semana*, mayor 11, 2015. [Online], Available: <http://www.semana.com/nacion/articulo/valentina-parra-hernandez-nina-que-queda-dormida-en-ruta-de-bus-en-bogota/427181-3> [Accessed enero 24, 2019]
- [3] Redacción EL TIEMPO, "La menor no presenta señales de maltrato': Medicina Legal," *El tiempo*, septiembre 28, 2016. [Online], Available: <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/nina-muere-dentro-de-ruta-escolar-en-cartagena-28461> [Accessed enero 15, 2019]
- [4] Diario El País, "Otro caso de olvido de una niña en ruta escolar, esta vez en el sur de Cali," *El pais*, octubre 28, 2016. [Online], Available: <http://www.elpais.com.co/california/otro-caso-de-olvido-de-una-nina-en-ruta-escolar-esta-vez-en-el-sur-de.html> [Accessed enero 27, 2019]
- [5] Ministerio de Transporte, Decreto 348 de 2015. Bogotá D.C.: Ministerio de transporte, 2015.
- [6] R. Sampieri, C. Fernández, M. Baptista, *Metodología de la investigación*, México DF: McGraw-Hill, 2014.
- [7] B. Hurtado, *Metodología de la investigación, una comprensión holística*. Caracas: Ediciones Quirón, 2008.
- [8] G. Cardero, *Terminología y procesamiento*. México D.F.: UNAM, 2003.
- [9] D. Barculo, J. Daniels, *Telemetry: Research, Technology and Applications*. Londres: Nova Science Publishers, 2009.
- [10] J. Gullón, *Estudio de Antenas de Telemetría Y Telecomando (TTC) Embarcadas en Satélite*, 2009.
- [11] C.Sagues, A.R. Mosteo, D.Tardioli, "Sistema multi-robot para localización e identificación de vehículos," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 9, Enero, pp. 69-80, 2012.
- [12] C. Tarco, *Estudio e implementación de un prototipo de prueba para un sistema de localización automática vehicular integrado a un sistema de radiocomunicaciones para Invetrónica Cía. Ltda*, Quito, 2010. [E-book] Available: Biblioteca digital Escuela Politécnica Nacional.
- [13] United States Patent and Trademark Office, "United States Patent and Trademark Office (USPTO)," [Online] Available: <https://www.commerce.gov/doc/united-states-patent-and-trademark-office#4/37.71/-99.48> [Accessed febrero 24, 2017]
- [14] R. Tendler, "Cellular phone based automatic emergency vessel/vehicle location system," U. S. Patent 5555286A, 1996.
- [15] Z. Drorij, R. Woskow, "System for integrating a cellular telephone with a vehicle security system," U.S. Patent 5081667A, 1991.
- [16] W. Duvall, Method of and apparatus for utilizing geographically spread cellular radio networks to supplement more geographically limited stolen vehicle recovery radio networks in activation of radio tracking and recovery of such vehicles, U.S. Patent 7536169B2, 2009.
- [17] M. Obradovich, "Technique for operating a vehicle safely in a lane," U.S. Patent 7656310B2, 2013.
- [18] M. Obradovich, "Technique for operating a vehicle effectively and safely," U.S. Patent 7902969B2, 2017.
- [19] K. Moinzadeh, "Remote destination programming for vehicle navigation," U.S. Patent 8014942B2, 2009.
- [20] W. Duvall, Method of and apparatus for utilizing geographically spread cellular radio networks to supplement more geographically limited stolen vehicle recovery networks in activation of radio tracking and recovery of such vehicles, U.S. Patent 8086215B2, 2011.
- [21] B. Bates, "Secure cargo transportation system," U.S. Patent 7777608B2, 2014.

Metodologías para la construcción de un modelo prospectivo para la implementación de redes móviles 5G en Colombia

Félix R. Gómez D.¹

Guillermo F. Valencia P.²

Edgar F. Rodríguez V.³

Universitaria Agustiniiana Uniagustiniana – Colombia

Este capítulo presenta el avance en el proyecto de construcción de un modelo prospectivo para la implementación de redes móviles 5G en Colombia. Para la construcción del modelo prospectivo se realizó un estudio de benchmarking, del estado actual de despliegue de redes móviles de quinta generación en el ámbito internacional y, por otro lado, la comparación, a partir de referentes teóricos y experienciales, de las alternativas de prospectiva tecnológica que pudieran ser aplicables en la construcción del modelo. En específico se tienen en cuenta los métodos de escenarios, talleres de prospectiva estratégica, árboles de competencia, segmentación en áreas de actividad estratégica, entre otros. Uno de los hallazgos arrojados por el benchmarking realizado es que aun es pronto para decidir cuales serán las tecnologías que soporten los servicios ofrecidos por las redes móviles previstas. También se observa que la elección de la técnica para realizar la prospectiva depende del objeto de estudio y de los intereses de los actores.

1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas constituyen el principal motor de crecimiento de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones –TIC–. De acuerdo con la Unión Internacional de Telecomunicaciones –ITU–, al cierre de 2018, el número de abonados a la telefonía móvil celular era mayor que el de la población mundial, el 51,2% de las personas, es decir, 3900 millones, utilizaban Internet y, el número de abonados activos a la banda ancha móvil se contabilizó en 69,3 abonados por cada 100 habitantes. Independientemente de cuál sea la infraestructura de red: de nueva generación (NGN), 3G, 4G o 5G; las redes con conmutación de paquetes y estratificadas serán las que definan el paradigma del futuro. En países de todo el mundo los usuarios están abandonando las líneas fijas, sustituyéndolas por conexiones móviles de todo tipo, a través de teléfonos móviles, agendas electrónicas (PDA), llaves USB, computadoras de red y otro tipo de dispositivos [1], [2].

Según lo señala la ITU en el documento: Informe sobre Medición de la Sociedad de la Información, 2018, “los usuarios de computadoras en los países desarrollados parecen poseer más conocimientos sobre las TIC que los usuarios de los países en desarrollo, lo que indica una grave limitación del potencial de desarrollo de los países en desarrollo y los Países Menos Adelantados” [3].

No es secreto que los países desarrollados se encuentran en la vanguardia tecnológica en cuanto a redes de comunicaciones móviles se refiere; pero no es menos cierto, que países menos adelantados, como Colombia, deben encontrar la manera de dejar de importar tecnología de comunicaciones de forma esnobista y plantear sus propias formas de incorporar la tecnología, mediante procesos de transferencia más que de evangelización tecnológica.

En relación con la implementación de redes móviles de cuarta generación, por ejemplo, en 2008, la UIT publicó un conjunto de requisitos para un sistema de comunicaciones de cuarta generación (4G) con el nombre IMT-Avanzado. De acuerdo con estos requisitos, la velocidad máxima de datos debería ser de al menos 600 Mbps en el enlace descendente y 270 Mbps en el enlace ascendente, con una anchura de banda de 40 MHz (cifras que superan las capacidades de LTE). Impulsado por los requisitos de la ITU, el 3GPP comenzó a estudiar cómo mejorar las capacidades de LTE. Como resultado del estudio surgió la especificación del sistema conocido como LTE-Advanced, la cual se espera pueda entregar velocidad de datos pico de 3000 Mbps en el enlace descendente, y 1500 Mbps en el enlace ascendente, usando un ancho de banda total de 100 MHz, conformado por cinco portadoras separadas a 20MHz cada una. Las primeras redes LTE se lanzaron en Noruega y Suecia a finales de 2009 y, se espera que, para finales de 2019 existan más de 2.500 millones de suscriptores de redes LTE en todo el mundo.

No se han terminado de implementar redes 3G en el mundo, las redes 4G se encuentran aún en desarrollo y ya se realizan pruebas comerciales de redes 5G. Esta desenfadada carrera de los países desarrollados hace que los menos adelantados cometan errores de perspectiva que a largo plazo resultan ser costosos. Es el caso de la implementación de las primeras redes de telefonía móvil celular en Colombia, las cuales se implementaron bajo el estándar norteamericano analógico AMPS (Advanced Mobile Phone Systems) y, que antes de cinco años fueron migradas a redes digitales bajo los estándares norteamericanos TDMA (Time Division Multiplexing Access) y CDMA (Code Division Multiplexing Access) y, posteriormente al estándar europeo GSM (global System for Mobile Communications). El costo de estos cambios sobre las redes fue asumido finalmente por los usuarios de los servicios.

¹ felix.gomez@uniagustiniana.edu.co

² guillermo.valencia@uniagustiniana.edu.co

³ edgar.rodriguez@uniagustiniana.edu.co

Desarrollar un modelo de prospectiva para la implementación de redes móviles 5G en Colombia es no sólo necesario sino urgente y, aunque se han desarrollado estudios por parte de entidades como el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y la Agencia Nacional del Espectro, ninguno de estos estudios constituye el resultado de escenarios prospectivos.

2. PROSPECTIVA

En palabras de Cardozo, prospectiva es la manera de enfocar o concentrarse para concretar el futuro, imaginándolo a partir de las deducciones extraídas en el presente de los hechos portadores de futuro. La prospectiva requiere que el planificador construya o diseñe un futuro deseable, y piense y actúe como si ya existiera, de ese modo la planeación o planificación se desarrolla desde el futuro al presente, es decir, del futuro al hoy [4].

Por otro lado, Miklos y Tello [5] plantean que la prospectiva permite centrar la atención sobre el porvenir, imaginándolo a partir del futuro y no del presente, consiste en generar visiones alternativas de futuros deseados, identificar las creaciones factibles y determinar las líneas de acción para alcanzar esos futuros deseados. De acuerdo con este planteamiento, se tienen en cuenta los elementos que permitan o posibiliten estructurar las imágenes del futuro de las ciudades deseadas o anheladas en un horizonte de largo plazo. Debido a que la sociedad es un sistema abierto, es decir, que no se sujeta a una única ley general que determina el futuro, éste se piensa como un abanico abierto de alternativas o posibilidades de futuribles o futuros posibles, con lo cual se construye el devenir social mediante las apuestas y la toma de decisiones en el presente. Además, es importante que se tenga un pensamiento de largo plazo, el cual se ocupa de la formulación de la visión estratégica de un país, territorio o institución, es decir, de la elaboración de una imagen estructurada del futuro, tal es el caso de las ciudades educadoras. El pensamiento de largo plazo es útil para contribuir a la formulación de la visión estratégica de una institución pública [4].

De acuerdo con Godet, los conceptos de prospectiva, estrategia, planificación están en la práctica íntimamente ligados, cada de ellos conlleva el otro y se entremezclan. Cada uno de estos conceptos representa un referente de definiciones, de problemas y métodos donde la especificidad de cada uno de ellos es evidente. Señala Godet que, para ser fecundo, es decir: portador de futuro, el matrimonio entre la prospectiva y la estrategia debía encarnarse dentro de la realidad cotidiana y dar lugar a una verdadera movilización de la inteligencia colectiva a través de la apropiación (por todos los actores concernientes, situados desde arriba hasta abajo de la jerarquía) [6].

3. REDES MÓVILES 5G

El término 5G hace referencia a la quinta generación de comunicaciones móviles. Esta tecnología está siendo desarrollada por el 3GPP (3rd Generation Partnership Project), cuyo objetivo inicial fue desarrollar las especificaciones del sistema global de comunicaciones móviles, con base en el sistema evolucionado GSM (Global System for Mobile Communications). La situación actual de 5G, de acuerdo con 3GPP es la siguiente:

- Como se puede observar en la Figura 1, la organización de estándares de la industria móvil (3GPP) aún se encuentra trabajando en su propuesta de estándar para el desarrollo comercial de 5G, la cual debe ser entregada a UIT en junio de 2019, para su posterior expedición de la versión final del Estándar IMT-2020.

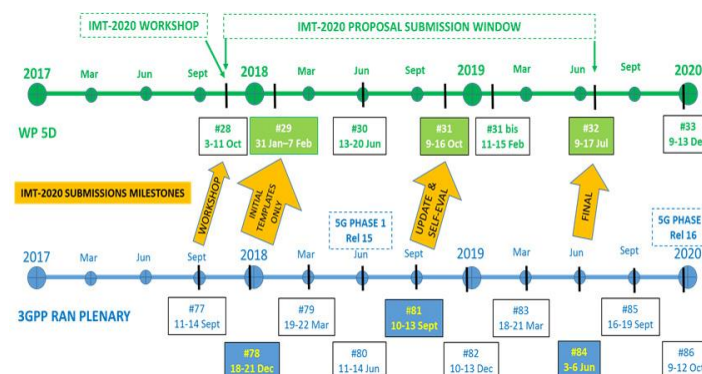


Figura 1. Roadmap de estandarización para 5G

- La 3GPP completó los requerimientos para la migración a 5G (Release 15) en junio de 2018 e inició la etapa final de su propuesta de estandarización completa (Release 16) para 5G, que terminará en diciembre de 2019.
- En la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones –CMR-19–, la UIT deberá acordar la atribución de nuevas bandas de frecuencias (300 – 3000 MHz, 3 – 30 GHz, 30 – 300 GHz) y los requerimientos de uso de las redes 5G.
- Proyecciones de Ericsson indican que habrá 1063 millones de usuarios de 5G en 2023, de los cuales 25 millones serán de Latinoamérica.

- Varios países (Reino Unido, Alemania, EEUU, Finlandia, Japón, Corea del Sur, China, India) han iniciado la implementación de 5G, a través de pruebas piloto comerciales, para presionar el proceso de estandarización o bien para fijar posiciones estratégicas para la CMR-19
- Para el despliegue de 5G se requiere aún de muchos esfuerzos de coordinación entre la UIT, sus Estados Miembros y la industria móvil. Para la CMR-19, los Estados Miembros de la UIT esperan acordar no sólo la atribución de nuevas bandas de frecuencias para 5G sino también los requerimientos para su uso dentro de ciertos rangos de frecuencia, incluyendo las condiciones de coexistencia de aplicaciones en bandas adyacentes.

3.1 Estado actual de despliegue de redes móviles 5G en el ámbito internacional

Teniendo en cuenta el acelerado desarrollo de las comunicaciones móviles, la UIT promulga una serie de recomendaciones y reportes que pretenden estimar el futuro en cuanto a atribución de bandas de frecuencias para estos propósitos. La Recomendación UIT-R M.1645 [7], por ejemplo, define el marco y los objetivos generales del desarrollo futuro de las IMT 2000 y los sistemas posteriores, para la red de acceso radioeléctrico. En el mismo sentido, el Informe UIT-R M.2290 [8] estima los futuros requerimientos de espectro para IMT y el Informe UIT-R M.2243 [9], evalúa los despliegues y previsiones mundiales de banda ancha móvil para IMT. Finalmente, el Informe UIT-R M.2370 [10] permite estimar el tráfico de las IMT para los años 2020 a 2030.

La definición del estándar IMT2020 a cargo la UIT para el desarrollo y despliegue de redes 5G y de tecnologías superiores, indican que las bandas de frecuencias candidatas para el despliegue de IMT2020 serán las bandas de frecuencias bajas por debajo de 1GHz dadas las condiciones de cobertura que estas ofrecen y los menores costos de inversión en los que se incurrirán para el despliegue de infraestructura (en particular la banda de 700 MHz), las bandas medias por las condiciones de cobertura y capacidad que ofrecen en áreas urbanas y suburbanas (en particular la banda de 3.5 GHz) y las bandas altas y milimétricas por las características técnicas que estas bandas ofrecen como son las altas velocidades de transmisión de datos, anchos de banda para desplegar redes dorsales, facilidad de cobertura en áreas densamente urbanas a través de celdas pequeñas (específicamente las bandas por encima de 24 GHz) y otras características y condiciones.

Del análisis de las reuniones y los trabajos preparatorios del ítem 1.13 de la agenda para la CMR-19, se puede prever que en las bandas milimétricas el foco de interés y discusión se centrará en las bandas de frecuencias de 24.25 - 27.5, 26.5 - 29.5, 37 - 43.5 y 66 - 71 GHz como se muestra a continuación en la Figura 2.

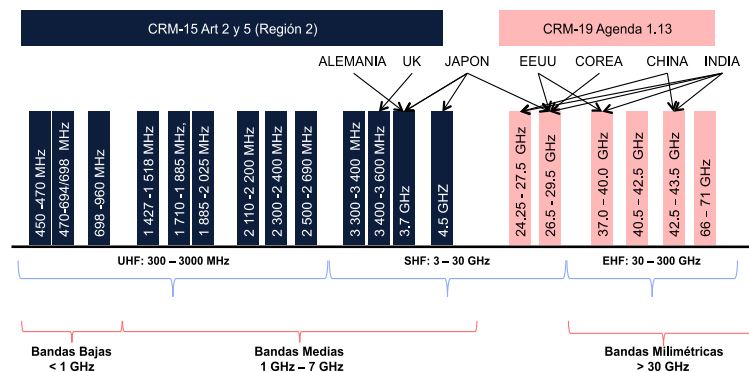


Figura 2. Bandas de frecuencias para implementar sistemas IMT y 5G

Lo anterior se sustenta no solo en las características y las condiciones técnicas y económicas que ofrecerían las bandas milimétricas para el despliegue de redes 5G y de tecnología superior sino también por el hecho que muchos países (entre ellos Reino Unido, Alemania, EEUU, Finlandia, Japón, Corea del Sur, China, India) ya iniciaron una carrera agresiva por 5G, bien sea a través de pruebas piloto para comercializar 5G, o bien para presionar el proceso de estandarización de IMT-2020 y/o para fijar posiciones estratégicas para la CMR-19 y no se han esperado a que la regulación y la estandarización para 5G esté completa.

El despliegue de redes 5G parece estar condicionado a los desarrollos en torno a 3,5 GHz y 3,7 GHz, principalmente, aun cuando algunos países han empezado a promover la investigación sobre la posible atribución de bandas superiores como 34 GHz, 37 GHz e incluso 80 GHz. Las principales bandas atribuidas por ahora en los países desarrollados son:

- B31 (450 LTE) 452,5-457,5/462,5-467,5 MHz
- B52 (3300) 3300-3400 MHz
- B43 (3700) 3600-3700 MHz
- B42 (EBS) 3400-3600 MHz
- B42 (3500 CBRS) 3400-3600 MHz

Los últimos eventos que se han realizado en el área de las telecomunicaciones se han centrado en las temáticas de IOT, seguridad de la información y 5G, este último ha sido en el que más se ha trabajado ya que se estima que en el 2025 5G representará hasta 1.100 millones de conexiones [1]. Para entonces, es probable que las redes 5G cubran un tercio de la población mundial. El impacto en la industria móvil y sus clientes será profundo.

En el simposio global para reguladores organizado por la UIT [11] se confirmó que las altas velocidades y la baja latencia prometidas por la 5G impulsarán a las sociedades a una nueva era de ciudades inteligentes y de la Internet de las cosas (IOT). Las partes interesadas de la industria han identificado varios casos potenciales de utilización de las redes 5G las cuales se pueden observar en la Figura 3, y el UIT-R ha definido los más importantes, que pueden clasificarse en tres categorías:



Figura 3. Casos potenciales de utilización de 5G

- Banda ancha móvil mejorada (eMBB): banda ancha interior y exterior mejorada, colaboración empresarial, realidad aumentada y virtual.
- Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC): IOT, rastreo de activos, agricultura inteligente, ciudades inteligentes, monitoreo de energía, hogar inteligente, monitoreo remoto.
- Comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC): vehículos autónomos, redes inteligentes, monitorización remota de pacientes y tele salud, automatización industrial.

Debido a la importancia que va a tener 5G varios investigadores están trabajando en aspectos como caracterización de bandas de frecuencia, redes y conexiones *fronthaul* y *backhaul*, seguridad de la información transmitida y el impacto social, técnico y económico. En lo que respecta a caracterización de las bandas, investigadores malayos [12] caracterizaron la banda de frecuencia de 28 GHz y 38 GHz ya que para lograr las velocidades de transmisión del estándar 5G serían muy útiles las ondas milimétricas, pero hay que tener en cuenta que el uso de estas va a traer pérdidas por propagación, retardos, desvanecimientos, pérdidas por dispersión, entre otros, y es por esto que resulta crucial la optimización de los parámetros de propagación. Para caracterizar las bandas mencionadas anteriormente los investigadores utilizaron los modelos de pérdida por trayecto CI y ABG, y para decidir cuál de las dos bandas debería ser usada para 5G tuvieron en cuenta parámetros como throughput, throughput del usuario en el límite de la celda, promedio de throughput de la celda, eficiencia espectral e índice de equidad respecto a la capacidad de los usuarios de diferentes celdas. Los resultados arrojaron que la banda de frecuencia de 38 GHz en promedio tiene un desempeño mejor que la de 28 GHz, aunque esta última da una mejor eficiencia espectral, índice de equidad y throughput del usuario en el límite de la celda.

3.2 Principales retos para el despliegue de 5G

3.2.1 Retos para el despliegue de celdas pequeñas

En algunos países la regulación a retrasado el desarrollo de celdas pequeñas al imponer obligaciones financieras y administrativas excesivas para los operadores. Las limitaciones para el despliegue de celdas pequeñas incluyen procesos prolongados de obtención de permisos, largos ejercicios de adquisición, tarifas excesivas y regulaciones anticuadas que impiden el acceso.

3.2.2 *Backhaul* de fibra óptica

El despliegue de redes *backhaul* de fibra para celdas pequeñas, para soportar altas velocidades de datos y baja latencia, será uno de los mayores desafíos que enfrentan los operadores debido a la escasa disponibilidad de redes de fibra en muchas ciudades. El Reino Unido, por ejemplo, tiene una de las tasas de penetración de fibra más bajas de Europa, con una penetración del 2%, en comparación con una media europea de alrededor del 9%. Para incentivar la inversión en redes de fibra, el Gobierno del Reino Unido ha introducido un alivio de cinco años de las tasas de negocio en la nueva infraestructura de redes de fibra.

Cuando no sea rentable desplegar fibra, los operadores de *backhaul* deben considerar las tecnologías de *backhaul* inalámbricas. Un portafolio de tecnologías inalámbricas incluyendo PMP, mmWave y satélite debe ser considerado además de la fibra en este caso.

3.2.3 Espectro

La atribución e identificación del espectro armonizado a escala mundial en una gama de frecuencias requiere la coordinación entre la comunidad mundial, las organizaciones regionales de telecomunicaciones y las ANR y es uno de los mayores retos a los que se enfrentan las ANR para el despliegue satisfactorio de las redes 5G. La asignación uniforme tiene muchas ventajas, ya que minimiza las interferencias de radio a lo largo de las fronteras, facilita la itinerancia internacional y reduce el coste de los equipos. Este es el principal objetivo del proceso del UIT-R en las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR).

En particular, es necesario llegar a un consenso sobre los grandes bloques contiguos de espectro radioeléctrico armonizado a escala mundial -especialmente por encima de 24 GHz, cuando se dispone de grandes anchuras de banda, antes de que se prevea que en la CMR-19 se adopten decisiones definitivas sobre la identificación de espectro adicional por encima de 24 GHz para las IMT-2020 (5G). Estas decisiones serán el resultado de amplios estudios de compartición y compatibilidad del UIT-R entre el servicio móvil (incluidas las IMT-2020) y los servicios preexistentes en estas bandas de frecuencias y en las bandas de frecuencias adyacentes, así como de acuerdos entre países antes de la CMR-19 y en ella.

Varias ANR de países desarrollados consideran las bandas de 700 MHz, 3,4 GHz y 24 GHz para el despliegue inicial de 5G a fin de satisfacer los requisitos de cobertura y capacidad. También debe tenerse en cuenta la compartición del espectro para hacer un uso más eficiente del espectro disponible. Tradicionalmente, las ANR han asignado espectro a los operadores móviles con carácter exclusivo. Sin embargo, debido a la creciente necesidad, la compartición puede proporcionar un medio para mejorar el uso eficiente del espectro existente.

4. MODELOS DE PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

La prospectiva suele abarcar las necesidades sociales e individuales y los conocimientos, aunque suele enfocarse más en los conocimientos que en las necesidades. Los dos elementos básicos para desarrollar modelos prospectivos son las tendencias históricas y las discontinuidades. En este sentido, perfeccionar una tecnología conocida corresponde en particular al primer elemento, es decir, las tendencias históricas, en tanto que, la introducción de innovaciones suele hacer referencia a las discontinuidades.

En los países desarrollados, la capacidad de imaginar cambios concebibles hace de la prospectiva tecnológica una actividad que persigue en forma deliberada un futuro. No un futuro que hay que esperar, sino uno que está por inventar. Los programas de investigación que al fin desembocan en la consolidación de las innovaciones, responden a este mecanismo. Con esta visión, el desarrollo continuo de los campos de conocimiento (la tecnología) va paralelo al desarrollo de sus aplicaciones (los productos tecnológicos). Las grandes preguntas que motivan este proceso serían: ¿qué se necesita? ¿para qué sirve? ¿Qué puede afectarse? [13].

En relación con la afectación asociada al uso de cierta tecnología, surgen otros interrogantes que es necesario resolver desde el modelo prospectivo: ¿cómo afecta al medio ambiente? ¿Cómo afecta al mercado? ¿Cómo afecta a la mezcla de insumos? ¿Qué costos y qué ingresos genera? ¿Cómo afecta al comercio internacional? ¿Cómo afecta a los equilibrios de poder?

En otras palabras, y tal como lo plantea Treviño, la evaluación de impactos futuros de la tecnología se interesa principalmente por variables estratégicas de la sociedad y sus interrelaciones con el fenómeno tecnológico. El peso relativo que se asigne en cada caso a estas dos grandes dimensiones de la prospectiva, define la política, la estrategia, los programas, acciones y estímulos en materia de ciencia y tecnología, ya sea a nivel nacional, de empresas productoras, institutos de investigaciones o de enseñanza superior [13]. Es de conocimiento común que muchos de los avances tecnológicos en los países desarrollados se han originado a lo largo de la historia a partir de sus prioridades de defensa.

En los países en vías de desarrollo, la prospectiva tecnológica se torna un tanto diferente, puesto que se ve condicionada a una selección previa de problemas a resolver y de prioridades o preferencias, que implica necesariamente una determinación de decisores, de beneficiarios potenciales o de prioridades estratégicas. En este sentido, se requiere una estructura de mercados que haga posible que los propios usuarios de los productos tecnológicos faciliten los recursos para desarrollar, consolidar e introducir las innovaciones. De hecho, no cualquier invención interesante o incluso altamente creativa, alcanza un buen nivel de utilización en este tipo de sociedades. El modelo prospectivo adecuado para una determinada sociedad no necesariamente aplica a otra. Treviño plantea que, por ejemplo, una cierta sociedad puede preferir:

- Bajar el consumo de materiales estratégicos o escasos.
- Reducir el contenido de mano de obra.
- Promover la obsolescencia programada de los productos.
- Preservar ciertas ventajas competitivas.
- Dar mayor importancia a la defensa que a la distribución de la riqueza.
- Desarrollar productos y sistemas complejos de alto valor económico agregado.

La determinación del modelo prospectivo tecnológico a utilizar debe tomar como supuesto: qué tan preparada está la sociedad para impulsar activamente las innovaciones tecnológicas a través de mecanismos fuertes de comercialización, financiamiento, motivación, poder económico o político; qué tan clara es la visión del papel que juega la investigación en la construcción del futuro; qué tipo de indicadores conviene utilizar desde el punto de vista objetivo para valorar los efectos y consecuencias de la tecnología, a partir de una cierta visión nacional, ideológica y política. Resulta claro que, si los supuestos de una sociedad difieren de los de otras en algunos de los campos mencionados, su visión sobre el papel de la tecnología y, en consecuencia, su enfoque de la prospectiva tecnológica, deben también ser distintos.

Instrumentos como la extrapolación de tendencias, curvas logísticas y envolventes, análisis morfológicos, árboles de relevancia, se han utilizado con intensidad en trabajos de pronóstico. Otras técnicas como "Delfos" e Impactos Cruzados, han brindado gran utilidad en la generación y evaluación de ideas sobre posibles innovaciones y sus horizontes. Las técnicas de escenarios, monitoreo y modelos dinámicos han contribuido, a partir de visiones más globales, a precisar campos de interés para la prospectiva de la tecnología. Sin embargo, la mayoría de los estudios de prospectiva tecnológica consideran las decisiones tecnológicas relativamente autónomas. Exploran el futuro a partir de indicadores técnico-económicos, los cuantifican en el tiempo, imaginan efectos concretos ya sea por extrapolación o por saturación, entendiendo esto último como signo de que se requiere una discontinuidad.

La tecnología es, ante todo, una capacidad de resolver problemas económicamente y en forma reiterada. Por definición, adquirir esta capacidad debería hacer innecesario comprar tecnología. Al menos, comprar sin ofrecer nunca a cambio un bien de la misma naturaleza. Adquirir capacidad no es un problema de mercado, ni tampoco de imitación de modelos o repetición de recetas. Es consolidar una fuerza interior que haga posible manejar tanto los problemas como las excepciones. Es una suma de conocimiento y experiencia que se da en personas. Para nuestros países hay futuro tecnológico si se desarrolla esta capacidad [13].

De acuerdo con Pérez, la mejor forma de implementar la función de alerta tecnológica o vigilancia tecnológica que permita definir un modelo prospectivo tecnológico es sistematizar las fuentes de información de tecnología y originar un documento periódico en el que se plasmen las principales conclusiones y reflexiones sobre el escenario tecnológico futuro y sus consecuencias para el país o para cualquier institución que se vea afectada por el uso de la tecnología. Para la reflexión sobre el escenario tecnológico futuro es indispensable realizar una labor de prospectiva tecnológica. Aunque existen centros especializados en la realización de estudios de prospectiva, se puede realizar una primera aproximación al problema utilizando algunas herramientas específicas, como las curvas, la técnica Delphi y la simulación de escenarios [14]. Según lo planteado por Pérez, existen dos formas sencillas de predecir el futuro: La técnica Delphi y el Análisis de escenarios. Tabla 1 ilustra la idea de Pérez en relación con estas dos técnicas.

Tabla 13. Técnica Delphi y el Análisis de escenarios

Método	Objetivo	Descripción
Técnica Delphi	Predecir el futuro a partir de la opinión de expertos.	Una vez seleccionado un panel de expertos, se solicita su opinión cuantificada sobre un parámetro, se determinan el valor medio y los cuartiles, y a aquellos expertos que están en los cuartiles extremos se les pide que expliquen su opinión. Los resultados estadísticos y los razonamientos de los extremos se envían a todos los expertos y se les pide una reestimación. El ciclo se repite dos o tres veces, hasta que la estimación empieza a converger. Con objeto de evitar que se polaricen las opiniones, cada experto debe ignorar quiénes son los otros miembros del grupo.
Análisis de escenarios	Hacer previsiones en entornos complejos, permitiendo comparar los riesgos entre decisiones alternativas. Proveer un conjunto lógico de condiciones, tendencias y modelos de simulación que ayuden a la planificación estratégica.	Hipótesis de futuros posibles, formulados a partir del pensamiento creativo sobre el futuro. A partir de un conjunto lógico de condiciones y tendencias, se simulan diferentes posibilidades de futuro.

Por otro lado, en el análisis comparativo de las principales metodologías utilizadas para la realización de análisis prospectivos, Anaya plantea diez técnicas que se listan a continuación [15].

- Árboles de competencia de Marc Giget
- Matriz de cambio de Michel Godet
- Matriz DOFA
- Clasificación de promedios de importancia
- IGO
- Juego de actores
- Análisis morfológico
- Ejes de Peter Schwartz
- Árboles de competencia
- Delphi

Pero, sin duda, los referentes por excelencia de herramientas y metodologías prospectivas son los doctores Peter Schwartz, quien se ha especializado en la planificación de escenarios para predecir futuros posibles y, Michel Godet, quien se ha especializado en la prospectiva estratégica. En relación con los escenarios, plantea Godet que un escenario es un conjunto formado por la descripción de una situación futura y un camino de acontecimientos que permiten pasar de una situación original a otra futura. Sin embargo, el mismo Godet aclara que la palabra escenario suele utilizarse de forma abusiva, calificando cualquier juego de hipótesis como escenario, olvidando que las hipótesis de un escenario deben cumplir simultáneamente cinco condiciones: pertinencia, coherencia, verosimilitud, importancia y transparencia [6].

Ahora bien, Godet no sólo se enfocó en el análisis de escenarios como herramienta prospectiva, sino que planteó una serie de instrumentos o métodos que relacionan estrategia y prospectiva. La Tabla 2, a continuación, presenta la síntesis de los métodos planteados por Godet para realizar prospectiva estratégica, la cual constituirá insumo esencial para desarrollar el modelo de prospectiva tecnológica para las redes móviles de 5G en Colombia.

Tabla 2. Métodos para realizar prospectiva estratégica

Método	Objetivo	Descripción
Método de escenarios	<p>Construir representaciones de los futuros posibles, así como el camino que conduce a su consecución.</p> <p>Poner en evidencia las tendencias fuertes y los gérmenes de ruptura del entorno general y competencial de la organización.</p>	<p>No existe un método único de escenarios. Fueron introducidos en prospectiva por Herman Kahn en los EE.UU. y por la DATAR en Francia. El método de escenarios desarrollado en el SEMA y el método SRI son los métodos más frecuentemente utilizados.</p> <p>Consiste en el examen sistemático de los futuros posibles.</p>
Talleres de prospectiva estratégica	<p>Iniciar y simular en grupo el conjunto del proceso prospectivo y estratégico. Identificar y jerarquizar, en común, los principales retos de futuro y localizar pistas para la acción frente a estos retos e ideas.</p>	<p>Los participantes del taller se integran en seminarios de uno o dos días de duración, en los cuales reflexionan sobre el problema expuesto, a partir de útiles de prospectiva. El grupo de trabajo se divide en sub-grupos que se reúnen durante sesiones de 2 a 4 horas. Ellos eligen sus temas de reflexión, entre los tres siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ la anticipación y el dominio del cambio; ▪ desconfiar de las ideas recibidas sobre la empresa y sus actividades; ▪ los árboles de competencias pasadas, presentes y de futuro <p>Al finalizar los talleres, los participantes han localizado y jerarquizado las principales apuestas de futuro, así como las ideas recibidas que merecen mirarlas lo más pronto posible. Estos talleres están, cualquiera que sea su tema, organizados alrededor de dos principios:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ permiten una gran libertad de palabra a todos los interlocutores (tiempos de reflexión individual en silencio, recoge todas las ideas por escrito) ▪ permiten canalizar la producción de participantes (principalmente por una gestión rigurosa del tiempo y sobre todo por los recursos sistemáticos de las técnicas tales como la clasificación de las ideas, la jerarquización, etc.).
Árboles de competencia	<p>Representar la empresa en su totalidad sin reducirla únicamente a sus productos y mercados.</p> <p>En estos árboles, las raíces (las competencias técnicas y el saber-hacer) y el tronco (capacidad de producción) son tan importantes como las ramas (líneas de productos, mercados).</p> <p>Permiten establecer una radiografía de la empresa a fin de tener en cuenta, sus competencias distintivas y su dinámica, en la elaboración de las opciones estratégicas.</p>	<p>La representación de una empresa en forma de árbol de competencias surgió del hecho de que, implícita o explícitamente, la mayor parte de las estructuras de organización en Japón eran presentadas bajo una forma arbórea: así, por ejemplo, tres círculos concéntricos para simbolizar la investigación, después la producción y por último la comercialización, esto es una representación de un árbol proyectado sobre un plano.</p> <p>La elaboración completa de un árbol de competencias impone una recogida exhaustiva de datos de la empresa (desde el saber-hacer hasta las líneas de productos y mercados) y de su entorno competencial. Esta recogida comparativa es indispensable para el diagnóstico estratégico del árbol de competencias: fortalezas y debilidades de las raíces, del tronco y de las ramas. Este diagnóstico debe ser retrospectivo antes que prospectivo. Para saber a dónde se quiere ir, es preciso saber de dónde se viene.</p>
Útiles de análisis estratégico	<p>Ayudar a dirigir las apuestas y la orientación de actividades de la empresa que se dirige</p>	<p>Los principales útiles y métodos de análisis estratégicos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ La segmentación en áreas de actividad estratégicas ▪ El ciclo de vida ▪ El efecto experiencia ▪ Los modelos de portafolio de actividades

Método	Objetivo	Descripción
		<ul style="list-style-type: none"> El análisis de los recursos fundamentales: desde las cadenas de valor a los árboles de competencia
Segmentación en áreas de actividad estratégica	Ayudar a dirigir las apuestas y la orientación de actividades de la empresa que se dirige	<p>Se considera que un segmento estratégico es una pareja producto-mercado en el interior de la cual existen fuertes sinergias de producción, de distribución.</p> <p>Cada segmento estratégico representa para la empresa un frente sobre el cual puede luchar aisladamente.</p> <p>Dos actividades forman parte de un mismo segmento estratégico si implica a los mismos competidores, a los mismos consumidores o si están estrechamente ligadas entre ellas a nivel de producción o de distribución, de modo y manera que toda acción sobre una de ellas (cambio de precio, de calidad, de servicio) tendrá repercusiones sobre la otra.</p>
Ciclo de vida	Ayudar a dirigir las apuestas y la orientación de actividades de la empresa que se dirige	<p>Plantea Godet que, según la célebre analogía biológica introducida por el americano R. Vernon, los productos se comportan como seres vivos y tienen un ciclo de vida que se divide en cuatro fases: nacimiento, crecimiento, madurez y declive. La evolución de las ventas y el tamaño del mercado de un producto en función del tiempo presenta el comportamiento siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fase I, producto recién nacido: mercado monopolístico u oligopolístico, problemas de puesta a punto. Fase II, producto en pleno desarrollo (adolescente): aparición de numerosos competidores nuevos, necesidades de inversiones masivas para adquirir o conservar una parte del mercado. Fase III, producto en la edad madura: pocos competidores nuevos, productos muy rentables que exigen pocas inversiones. Fase IV, producto que envejece: mercado en regresión.
Efecto experiencia	Ayudar a dirigir las apuestas y la orientación de actividades de la empresa que se dirige	<p>La repetición de tareas idénticas por parte del personal de una empresa, lo convierte en cada vez más experimentado y permite un desarrollo de las ganancias de productividad.</p> <p>Esta experiencia compartida es un insumo fundamental del análisis estratégico.</p>
Modelos del portafolio de actividades	Ayudar a dirigir las apuestas y la orientación de actividades de la empresa que se dirige	<p>Segmentación de las actividades de la empresa y en un posicionamiento en relación a los factores claves de éxito juzgados como fundamentales. Permiten una gestión dinámica de los productos a la cual se adjunta muy frecuentemente estrategias de marketing y financiero.</p> <p>Los modelos del portafolio de actividades más conocidos son los de BCG (Boston Consulting Group), ADL y Mackinsey.</p> <p>Todos los métodos de portafolio de actividades comienzan a partir de dos preguntas estratégicas que la empresa se formula después de haber dividido sus actividades en áreas específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿cuál es mi posición relativa respecto a cada una de estas áreas? ¿cuál es el valor o interés presente y futuro de estas áreas?
Método del BCG	Ayudar a dirigir las apuestas y la orientación de actividades de la empresa que se dirige	<p>Para responder a la primera pregunta estratégica, el B.C.G. considera la participación relativa en el mercado como un buen indicador de la posición competitiva de un área, tomando como base el principio de la curva de experiencia presentado en la sección anterior.</p> <p>La respuesta a la segunda pregunta se aprecia a través de un indicador de la tasa de crecimiento del mercado, la cual a su vez está estrechamente relacionada con la fase del ciclo de vida de la actividad considerada.</p> <p>El B.C.G. distingue dos niveles, "alto y bajo", para estos dos indicadores, a partir de los cuales construye una matriz que representa:</p> <ul style="list-style-type: none"> en la abscisa, la participación relativa en el mercado; ésta es alta si la empresa tiene una participación en el mercado superior al valor X (siendo X la participación en el mercado del competidor más importante en el segmento considerado), y baja en el caso contrario; en la ordenada, la tasa de crecimiento del mercado del segmento estratégico en cuestión. No existe una regla precisa que permita determinar el umbral a partir del cual el crecimiento se considera alto o bajo. Razonablemente, puede tomarse como umbral el promedio de las tasas de crecimiento de los segmentos estratégicos de las empresas del mismo sector.
Método ADL	Ayudar a dirigir las apuestas y la orientación de actividades de la empresa que se dirige	<p>Para responder a las dos preguntas estratégicas fundamentales, los asesores de A.D.L. aportan respuestas menos rígidas y más realistas que las del BCG:</p> <ul style="list-style-type: none"> El valor del área específica de actividad se evalúa a través de la noción de madurez del sector, siendo la tasa de crecimiento del mercado sólo uno de los aspectos. Se encuentran también las cuatro fases (nacimiento, crecimiento, madurez y decadencia). La posición competitiva de un área se evalúa a través de una batería de criterios entre los cuales la participación relativa en el mercado no necesariamente es el más importante.
Análisis de recursos: las cadenas de valor	Ayudar a dirigir las apuestas y la orientación de actividades de la empresa que se dirige	<p>La producción de bienes y de servicios recurre a entradas que son objeto de transformaciones y valoraciones (técnicas, comerciales, etc.). Existe una cadena de función de transformación que va desde la I+D hasta la postventa, pasando por el proyecto, la producción y la distribución. La cadena de valor se asemeja a un árbol de competencias visto desde arriba:</p> <ul style="list-style-type: none"> Servicio

Método	Objetivo	Descripción
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distribución ▪ Marketing ▪ Fabricación ▪ Concepción ▪ Tecnología
Diagnóstico estratégico	<p>Conocer las fuerzas y las debilidades de los recursos fundamentales: humanos, financieros, técnicos, productivos y comerciales. (Diagnóstico interno).</p> <p>Identificar sus bazas y sus desventajas no basta; hay que estimar también su importancia a través de las amenazas y de las oportunidades que provienen del entorno estratégico. (Diagnóstico externo).</p>	<p>Diagnóstico interno: fuerzas y debilidades del árbol de competencias Conocer bien los productos, mercados, técnicas, hombres e historia de la empresa para poder delimitar el entorno útil que debe estudiarse. Incluye los aspectos financieros, operativos y funcionales, a los que hay que añadir el aspecto tecnológico y el de calidad.</p> <p>Diagnóstico externo: amenazas y oportunidades. Dentro de un mundo en el que se encarna un papel, la empresa debe considerarse como actor de una interpretación en la que intervienen los copartícipes de su entorno competitivo y debe tomar posición ante cada uno de los actores de su entorno estratégico.</p> <p>Los actores del entorno competitivo inmediato, de acuerdo con Porter son: los competidores en un mismo mercado, los proveedores, los clientes, los entrantes potenciales y los productores de sustitutos [16]. Los actores del entorno general son: los poderes públicos, la banca, los medios de comunicación, los sindicatos, los grupos de presión. La empresa debe posicionar sus ámbitos de actividades estratégicas y plantearse:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ ¿cuál es su futuro? ▪ ¿cuál es mi posición concurrencial? ▪ ¿cuáles son los factores clave de éxito? ▪ ¿cuáles son las competencias distintivas a mi posición o que debo adquirir para mejorar mi posición?
Análisis estructural	<p>Describir un sistema con ayuda de una matriz que relaciona todos sus elementos constitutivos.</p> <p>Identificar las principales variables influyentes y dependientes y con ello las variables esenciales para la evolución del sistema.</p>	<p>Se realiza por un grupo de trabajo compuesto por actores y expertos con experiencia demostrada.</p> <p>Las diferentes fases del método son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fase 1. Listado de las variables ▪ Fase 2. Descripción de relaciones entre variables ▪ Fase 3. Identificación de variables clave
Método Mactor	<p>Valorar las relaciones de fuerza entre los actores y estudiar sus convergencias y divergencias con respecto a un cierto número de posturas y de objetivos asociados.</p> <p>Facilitar a un actor una ayuda para la decisión de la puesta en marcha de su política de alianzas y de conflictos.</p>	<p>El método Mactor comprende siete fases:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fase 1. Construir el cuadro "estrategias de los actores" ▪ Fase 2. Identificar los retos estratégicos y los objetivos asociados ▪ Fase 3. Situar cada actor en relación con los objetivos estratégicos (matriz de posiciones) ▪ Fase 4. Jerarquizar para cada actor sus prioridades de objetivos (matriz de posiciones evaluadas) ▪ Fase 5. Evaluar las relaciones de fuerza de los actores ▪ Fase 6. Integrar las relaciones de fuerza en el análisis de convergencias y de divergencias entre actores ▪ Fase 7. Formular las recomendaciones estratégicas y las preguntas clave del futuro
Análisis morfológico	<p>Explorar de manera sistemática los futuros posibles a partir del estudio de todas las combinaciones resultantes de la descomposición de un sistema.</p> <p>Evidenciar la conducta de los nuevos productos en previsión tecnológica pero también la construcción de escenarios.</p>	<p>El análisis morfológico comporta dos fases:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fase 1. Construcción del espacio morfológico ▪ Fase 2. Reducción del espacio morfológico
Método Delphi	<p>Poner de manifiesto convergencias de opinión y hacer emerger ciertos consensos en torno a temas precisos, mediante preguntas a expertos por medio de cuestionarios sucesivos.</p> <p>Aportar iluminación a los expertos sobre zonas de incertidumbre a fin de ayudar a la decisión.</p>	<p>El Método Delphi comporta tres fases:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fase 1. Formulación del problema ▪ Fase 2. Elección de expertos ▪ Fase 3. Desarrollo práctico y explotación de resultados
Ábaco de Regnier	<p>Interrogar a los expertos y tratar sus respuestas en tiempo real o por vía postal a partir de una escala de colores.</p> <p>Reducir la incertidumbre, confrontar el punto de vista de un grupo con el de otros grupos y a la vez, tomar conciencia de la mayor o menor variedad de opiniones.</p>	<p>Se trata de una escala de decisión coloreada, que utiliza siete colores: verde, naranja, rojo, verde claro, rojo claro, blanco y negro.</p> <p>El método comporta tres fases:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fase 1. Recolección de la opinión de los expertos ▪ Fase 2. Tratamiento de los datos ▪ Fase 3. Discusión de los resultados
Impactos cruzados probabilizados smic-prob-expert	<p>Determinar las probabilidades simples y condicionadas de hipótesis o eventos, así como las probabilidades de combinaciones de estos últimos, teniendo en cuenta las interacciones entre los eventos y/o hipótesis.</p> <p>Examinar las combinaciones de hipótesis que serán excluidas a priori.</p>	<p>Consiste en una familia de técnicas que intentan evaluar los cambios en las probabilidades de un conjunto de acontecimientos como consecuencia de la realización de uno de ellos. El método SMIC (Sistemas y Matrices de Impactos Cruzados) es de los más utilizados.</p> <p>Al considerar un sistema de N hipótesis, el método SMIC posibilita elegir entre las 2N imágenes posibles (juegos de hipótesis) aquellas que deberían (habida cuenta de su probabilidad de realización) ser estudiadas muy particularmente.</p> <p>El método consiste por tanto en vigilar estrechamente los futuros más probables que serán recogidos por el método de los escenarios.</p>

Método	Objetivo	Descripción
Árboles de pertinencia	Identificar opciones estratégicas compatibles a la vez con la identidad de la empresa y los escenarios más probables del entorno. Ayudar a la selección de acciones elementales u operaciones en vistas a satisfacer objetivos generales.	Consiste en jerarquizar un problema a partir de diferentes niveles, comenzando en el nivel superior. El método comprende dos fases: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fase 1. Construcción del árbol de pertinencia ▪ Fase 2. Notación del gráfico y la evaluación de las acciones
Multipol	Comparar diferentes acciones o soluciones a un problema en función de criterios y de políticas múltiples. Ayudar a la toma de decisiones mediante la construcción de un tablero de análisis y evolutivo de varias acciones-soluciones.	En este método cada acción es evaluada en función de cada criterio por medio de una escala simple de notación. Esta evaluación se obtiene por medio de cuestionarios o de reuniones de expertos, siendo necesaria la búsqueda de un consenso.

El método prospectivo planteado por Schwartz permite establecer escenarios futuros y determinar la prioridad de las acciones a tomar en el presente. Este método, conocido como “Ejes de Schwartz” permite construir escenarios objetivos mediante la identificación de un punto focal y unas fuerzas que lo definen, a partir de tendencias clave del entorno. Como resultado, se logra elaborar escenarios útiles para definir esquemas de decisión posibles y de contingencia. A partir de las distintas posibilidades, la elección de un “escenario apuesta” será el camino a recorrer desde el presente hacia el futuro [17].

De acuerdo con el método propuesto por Schwartz, el primer paso consiste en la determinación del microentorno y la definición de posibles temas focales; el segundo paso es la identificación de factores clave a nivel de microentorno y la revisión de variables, con el fin de precisar finalmente los principales factores de microentorno que serán considerados; el tercer paso consiste en la especificación de las fuerzas motrices (factores del macroentorno del sector); en el cuarto paso se obtienen las calificaciones otorgadas por los stakeholders a cada factor y fuerza direccionadora, en función del grado de importancia e incertidumbre. Esta jerarquización será tomada como punto de partida en la toma de decisión sobre los Ejes de Schwartz que se tendrán en cuenta; en el quinto paso, se desarrollan lógicas de escenario a partir de la selección de incertidumbres críticas tanto para factores claves del microentorno como para las fuerzas direccionadoras del macroentorno; en el sexto paso se desarrolla en detalle cada escenario; finalmente, en el séptimo paso se consideran las implicaciones de los escenarios.

En el artículo “Aplicación de los ejes de Schwartz como metodología de prospectiva tecnológica al modelo universitario-empresa en el contexto colombiano”, Montoya, presenta otro método, conocido como el Análisis Pestel, el cual se basa en el entorno externo de la empresa o actor que está siendo estudiado y, considera aspectos Políticos, Económicos, Sociales, Tecnológicos, Ecológicos y Legales, que permiten identificar el impacto que éstas puedan llegar a tener de manera interna [18]. Esta herramienta busca generar un listado de posibles tendencias, acontecimientos y variables que puedan afectar o tener incidencia sobre el tema en estudio. Puede considerarse un insumo esencial para la aplicación de los Ejes de Schwartz.

5. CONCLUSIONES

- Durante esta primera fase del proyecto ha sido posible identificar el estado actual de despliegue de redes móviles de quinta generación en el ámbito internacional, el nivel de desarrollo y las tendencias que marcarán el futuro de las comunicaciones móviles internacionales (IMT).
- De igual forma, se han podido identificar distintos métodos, herramientas, instrumentos, técnicas o metodologías de prospectiva, que permitirán construir un modelo prospectivo para la implementación de redes móviles 5G en Colombia.
- El estudio del mercado internacional de redes móviles de 5G ha permitido establecer que aún es pronto para decidir cuál o cuáles serán las tecnologías que soportarán los servicios ofrecidos por las redes móviles previstas, qué anchuras de banda requerirán y en qué bandas de frecuencias operarán y, en consecuencia, es arriesgado lanzar conjeturas a priori sobre el futuro de dichas tecnologías y servicios. Esto reafirma la necesidad de construir un modelo prospectivo para la implementación de redes móviles 5G en Colombia.
- Existe una gran cantidad de herramientas y técnicas para realizar prospectiva. La elección de una u otra está supeditada al objeto de estudio y al interés por parte de los stakeholders. En relación con la implantación de redes móviles de quinta generación, las metodologías de análisis de escenarios parecen ser las más adecuadas, puesto que permiten alejarse un poco de condiciones particulares de una u otra empresa para concentrarse en la oferta tecnológica y de servicios, fin último de las redes 5G.

REFERENCIAS

- [1] GSMA, “An Introduction to 5G Network Slicing,” *gsma.com*, Nov, 15, 2017. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/futurenetworks/5g/introduction-to-5g-network-slicing/>. [Accesed May, 13, 2019].

- [2] A. Osseiran, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," *IEEE Communications Magazine*, pp. 26-35, 2014.
- [3] International Telecommunications Union, "Informe sobre la medición de la sociedad de la información," 2018. [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/misr2018/MISR2018-ES-PDF-S.pdf>. [Accessed May, 12, 2019].
- [4] J. Medina, M. Escobar, L. Cardozo, H. Mosquera, A. Mosquera, *Construyendo la calidad en los ejercicios de prospectiva y vigilancia tecnológica*, 1st ed. Programa Editorial Universidad del Valle, 2014. [E-book] Available: Revistas univalle programa editorial catálogo.
- [5] T. Miklos y M. E. Tello, *Planeación prospectiva: una estrategia para el diseño del futuro*, México: Limusa, 1991.
- [6] M. Godet, *La Caja de Herramientas de la Prospectiva Estratégica*, París: Laboratoire d'Investigation Prospective et Stratégique, 2000.
- [7] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Recomendación M.1645: Marco y objetivos generales del desarrollo futuro de las IMT-2000 y de los sistemas posteriores," Jun, 2003. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1645/es>. [Accessed May, 13, 2019]
- [8] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Informe UIT-R M.2290-0: Future spectrum requirements estimate for terrestrial IMT," Dic, 2013. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2290-2014-PDF-E.pdf. [Accessed May, 12, 2019]
- [9] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Informe UIT-R M.2243-0 Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications," Nov, 2011. [Online]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2243-2011/es>. [Accessed May, 13, 2019]
- [10] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Informe UIT-R M.2370-0 IMT Traffic estimates for the years 2020 to 2030," Jul, 2015. [Online]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2370-2015/es>. [Accessed May, 12, 2019]
- [11] ITU GSR-18, "Setting the scene for 5G: Opportunities & Challenges," Jul, 1, 2018. [Online]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-D/Conferences/GSR/Documents/GSR2018/documents/DiscussionPaper_Setting%20the%20scene%20for%205G_GSR18.pdf. [Accessed May, 13, 2019]
- [12] F. Qamar, "15th Student Conference on Research and Development (SCOREd)," de Channel Characterization of 28 and 38 GHz MMWave Frequency Band Spectrum for the Future 5G Network, Putrajaya, 2017.
- [13] L. Treviño, *Prospectiva científica y tecnológica en América Latina: intercambio de experiencias CEE y América Latina*, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 1989.
- [14] J. Pérez M., *Estrategia, gestión y habilidades directivas: un manual para el nuevo directivo*, Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A., 1996.
- [15] Á. Anaya P., "Plan prospectivo estratégico para el modelo de responsabilidad social interno de la Transportadora de Gas Internacional TGI S.A.," Universidad de la Sabana, Bogotá, 2011.
- [16] M. E. Porter, *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017.
- [17] P. Schwartz, *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*, Nueva York: Bantam, 1991.
- [18] A. Montoya P., "Aplicación de los ejes de Schwartz como metodología de prospectiva," *Ingenierías USBMed*, vol. 8, no 1, 2017.

Sistema Internet de las Cosas para medición y monitoreo de variables medioambientales en la agricultura inteligente

Arnold López S.¹
Christian D. Bohórquez M.²
Ricardo C. Gómez V.³

Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano – Colombia

Este capítulo presenta el desarrollo de un aplicativo para el monitoreo y seguimiento de variables medio ambientales con la ayuda de un sistema Internet de las cosas (IoT) aplicado en la agricultura inteligente. Las mediciones utilizan diferentes dispositivos y herramientas que generan información, que permite obtener producciones eficientes de los recursos naturales. Para saber que herramientas son más efectivas en la agricultura inteligente, se generó un esquema de evaluación a partir de estándares internacionales utilizados en la implementación de esquemas IoT. El marco de referencia utilizado es el UNE 178 104 (Asociación Española de Normalización). En la aplicación del marco de referencia se obtiene las herramientas utilizadas en la implementación, y se decretan las variables ambientales a medir. Al generar la implementación, se tiene resultados claros de operatividad, medición y generación de alertas, determinan que es una herramienta funcional en la agricultura inteligente.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia se presentan inconvenientes en el sector agrícola por el rezago que se tiene en la implementación y adopción de nuevas tecnologías, encaminadas a la mejora constante de la agricultura [1], [2], entre las principales dificultades que se presentan encontramos la asistencia técnica y la deficiencia en infraestructura tecnológica [3], [4]. Las consecuencias de no estar preparados se evidencian en las problemáticas que se generaron por fenómenos naturales como el del niño para los años 2015-2016, el cual dejó devastadoras secuelas y problemas a los agricultores [5]. Los fenómenos naturales evidentemente no son un riesgo que se pueda controlar, pero si se puede mitigar el peligro y la afectación de estos [6].

Con el propósito de disminuir estas afectaciones, se propone adaptar nuevas tecnologías para el sector agrícola en Colombia, planteando la aplicación de IoT [7], [8], utilizada para crear sistemas autónomos que ayuden a la mejora de cultivos. Para la implementación de sistemas de comunicación eficientes para IoT se tienen diferentes alternativas, con el fin de entregar disponibilidad total en términos de diseño, desarrollo, integración y soporte, como se puede visualizar en la Figura 1.

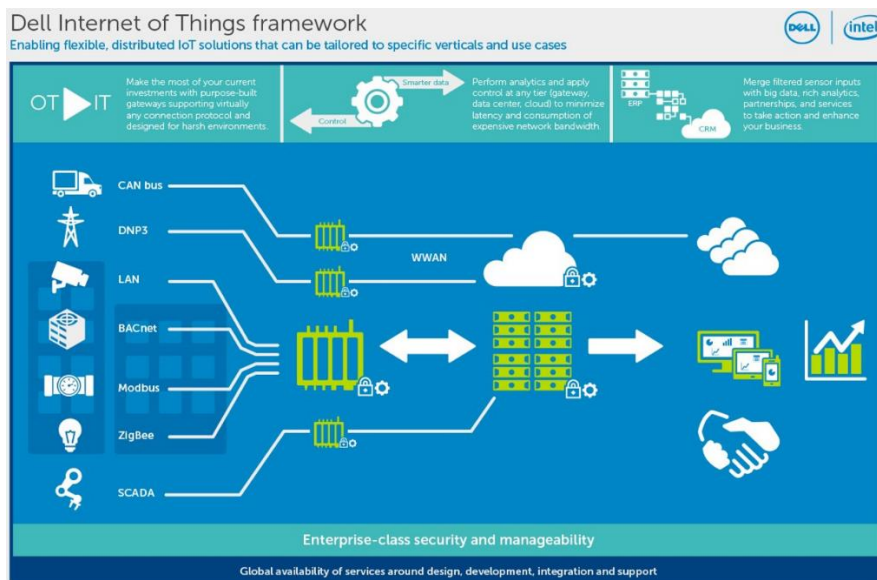


Figura 1. Planteamiento del sistema IoT [9]

En la Figura 1, se puede apreciar un esquema para la implementación de IoT, teniendo en cuenta cada una de las iteraciones que hacen los datos con los dispositivos que componen la red y el procesamiento que pueden llegar a tener, para dar el valor agregado a los datos recolectados por las cosas. En el proceso de implementación de la arquitectura IoT, se llevan a cabo las prueba y gestión de plataforma para obtener resultados de funcionalidad y comprobar que la herramienta generada es útil en la agricultura inteligente, ayudando al desarrollo integral de las nuevas tendencias tecnológicas y articulación con temas, como lo es el caso estudio de este trabajo.

¹ arlopezs1@poligran.edu.co

² cdbohorquez1@poligran.edu.co

³ rgomezva@poligran.edu.co

2. MÉTODO

Para el desarrollo de este trabajo se decidió utilizar una evaluación documental, debido a que nos ayuda a disminuir tiempo y costo. La guía del desarrollo metodológico está dada por la arquitectura IoT, como se visualiza en la Figura 2, en la cual tenemos tres frentes de operación.

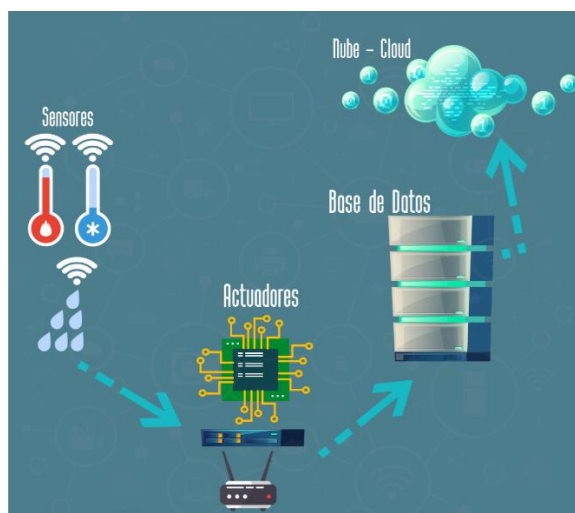


Figura 2. Diagrama de red

Tenemos los sensores (variables que necesitamos medir), actuadores que es el lugar donde realizamos la toma de valores de las variables antes descritas y también tenemos la conexión hacia la nube, a continuación tenemos la base de datos que es la parte más importante de los actuadores ya que se encarga de guardar todas nuestras variables para poderlas implementar en un gráfico adecuado en la nube, ahora bien, el servidor (nube) corre nuestro programa de Grafana el cual es nuestro visualizador y parte del procesamiento de la información que guardan los motores de datos, todo esto se relaciona para brindarnos el desarrollo de nuestro proyecto adecuadamente.

2.1 Evaluación de plataforma (Nube)

Para poder hacer una evaluación a través de un estándar y escoger la plataforma correcta, según la necesidad del trabajo, primero debemos saber que son las plataformas Open Source. Una plataforma Open Source o código abierto, está compuesta por una comunidad que trabaja para el desarrollo de ideas que culminan en un software para satisfacer una necesidad, teniendo en cuenta que ese software es de licenciamiento libre sin necesidad de hacer una transacción para su uso [9]. En el propósito de utilizar software Open Source aplicada a IoT [10], tenemos varias herramientas que ofrecen diferentes características y es por esto que se hace una evaluación documental del siguiente software:

- Microsoft Azure IoT suite [11]
- Kaa [12]
- Thingier.io [13]
- Grafana [14]

Este software fue seleccionado porque ofrecen amplia variedad de herramientas desde su comunidad de desarrolladores. El gobierno de España y el observatorio nacional de telecomunicaciones y de la SI de dicho país han hecho un estudio de comparativa de estándares de referencia para ciudades inteligentes, en el que se encuentra el estándar UNE 178 104 (Asociación Española de Normalización) [15] y el TS-0001 (oneM2M) [16]; En los que se define una metodología de análisis y cumplimiento de requisitos y la aplicación de estos estándares han involucrado diferentes áreas de uso de IoT. Este estudio presenta los diferentes requisitos de cada estándar con el fin de seleccionar la plataforma adecuada. Para este trabajo se ha escogido el estándar UNE 178 104 porque nos brinda una mayor facilidad de evaluación, ya que no busca ser específico en lo técnico, si no, una evaluación general. Esta facilidad de evaluación se evidencia en las siguientes secciones.

- *Repositorio de Información.* El repositorio de Información es el lugar donde se tiene almacenado todos los datos tomados de cada una de las variables (sensores) que se tienen en los cultivos y de las que a partir de procesamiento se obtiene visualización con información para el agricultor y posibilita la toma de decisión.
- *Gestión de Infraestructura.* La gestión de infraestructura permite la configuración de los sensores y actuadores que se tienen en los cultivos, de esta gestión parte la escalabilidad de la red de los sensores/actuadores y es la base para generar el repositorio de información.

- *Interoperabilidad.* En la búsqueda de información global, se deben generar datos para ser visualizados en otras plataformas o en diferentes canales de comunicación (aplicaciones móviles, web, etc.), esto hace que se puedan tener mejores soluciones a problemas o adaptación a cambios generados por la rotación de cultivos.
- *Seguridad.* La seguridad de la información es uno de los puntos más relevantes, ya que genera integridad, disponibilidad y confidencialidad a los conjuntos de datos obtenidos de los cultivos, partiendo de la toma de datos hasta la visualización y generación de acciones a través de los actuadores.
- *Mantenimiento.* El mantenimiento continuo implica tener datos integrales, garantizando una visualización sea fiable. La generación de correctivos y demás acciones posibilita que los cultivos den mejores resultados.
- *Desarrollo de aplicaciones.* La generación de aplicaciones dentro del entorno de gestión de la información hace que se obtenga mayores beneficios con los datos obtenidos a través de sensores/actuadores como lo puede ser la realización de control de calidad, planificación en el cultivo y demás.
- *Soporte a Decisión.* Los datos obtenidos por los sensores/actuadores nos deber permitir correctivos hacia el futuro como lo pueden ser planes de actuación ante plagas, análisis estadístico para mejorar en producción con respecto a un producto en próximas siembras y demás.
- *Publicación de Información.* En la generación de nuevos conocimientos y mejoras en la agricultura se debe compartir con el público los datos recolectados, esto se hace a través de un plan que determina como se publica y que personas acceden a ella con el fin de tener la integridad de los datos de los cultivos.
- *Resistencias a Fallas.* El no tener resistencia a fallas se refleja en que los cultivos puedan tener afectaciones de gran impacto, debidos a los cambios de temperaturas. Por ello se debe tener disponibilidad de servicios 24/7 o recuperación de información.

Los resultados obtenidos después de haber aplicado la sección de “Requisitos Funcionales” del estándar UNE 178 104 a las cuatro plataformas Open Source se muestran en escala de medición de la Tabla 1.

Tabla 14. Escala de evaluación

Escala de evaluación		
Cumple satisfactoriamente	1,0	La plataforma cumple con lo solicitado - cumple el 100%
Cumple parcialmente	0,5	La plataforma lo implementa de manera parcial
No cumple	0,0	No existe
No aplica		No es aplicable para la plataforma.

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos tras la evaluación según la escala de evaluación que se enuncia anteriormente. Los resultados se generan a partir de las necesidades de la agricultura inteligente.

Tabla 15. Resultados evaluación de plataforma [15]

Requisitos Funcionales	Microsoft Azure IoT Suite	Kaa	Thingier.io	Grafana
Repositorio de Información	0,800	0,700	0,900	0,900
Gestión de Infraestructura	0,333	0,833	0,917	0,917
Interoperabilidad	0,667	0,833	0,833	1,000
Seguridad	0,682	0,773	0,864	0,955
Mantenimiento	0,750	0,750	1,000	0,875
Desarrollo de Aplicaciones	0,857	0,786	0,857	0,929
Soporte a la Decisión	1,000	0,900	0,900	1,000
Publicación de Información	0,833	1,000	1,000	0,917
Resistencia a Fallas	1,000	1,000	0,500	0,750
Total	0,769	0,842	0,863	0,916

En la Tabla 2 se presentan los requisitos funcionales que están compuestos por descriptores obtenidos del marco de referencia utilizado que es el UNE 178 104[15], estos descriptores están valorados según la escala de evaluación anterior, para hacer la valoración documental se extrae desde la documentación que tiene cada plataforma en sus sitios oficiales de Internet [11] – [14]. De la Tabla 2 se puede deducir que Microsoft Azure IoT Suite, presenta deficiencias en la gestión de Infraestructura, esta dificultad se genera por los topes que tienen al uso de su plataforma. Al momento en que se desea gestionar la infraestructura se debe hacer el pago para el uso de más APIs. En general se puede concluir que el software recomendado para la utilización en agricultura inteligente es Grafana, puesto que sus características ayudarán a un mejor desarrollo e implementación ya que sus herramientas internas son robustas y gratuitas perfectas para nuestra implementación.

- *Evaluación de red (Núcleo).* La red, es el medio por el cual viajan los datos que son tomados a través de los sensores y transportados hasta la nube, para ser almacenados y posteriormente procesados. La información generada del

procesamiento genera decisiones que son enviadas nuevamente por la red hasta su destino (Borde), estos mensajes pueden ser informativos o de decisión. El diagrama de red se muestra en la Figura 2, donde se observan cuál sería el viaje que tendrán los datos y que dispositivos utilizaremos.

- *Server o Servidor.* El servidor es el encargado de almacenar y procesar nuestros datos recolectados por los sensores, el dispositivo que se utilizara es el “PowerEdge T430” de la empresa Dell, cuyas especificaciones se muestran técnicas se muestran en la Tabla 3. El PowerEdge T430 se encuentra al alcance para ser utilizado y cumple con las necesidades de la Plataforma seleccionada.

Tabla 16. Especificaciones del servidor (Tomado tienda online de Dell)

Especificaciones Técnicas		
Procesador	Intel® Xeon® E5-2600 v4	
Sistema Operativo	Ubuntu Server	
Memoria	DIMM DDR4 de hasta 2400 MT/s RAM máxima: hasta 384 GB (12 ranuras DIMM): 4 GB/8 GB/16 GB/32 GB	
Comportamiento de Unidades	Hasta 8 unidades SSD, SAS Nearline, SATA, SAS de 3,5 in con compartimiento flexible opcional	
	Hasta 4 unidades SSD, SAS Nearline, SATA, SAS de 3,5 in sin compartimiento flexible opcional	
	Hasta 16 unidades SSD, SAS Nearline, SATA, SAS de 2,5 in con compartimiento flexible opcional	
Chasis	Altura	443,3 mm (17,45")
	Ancho	443,3 mm (17,45")
	Profundidad	558,6 mm (21,99")
Alimentación	PSU de conexión en marcha de 495 W, 750 W, 1100 W	
	PSU de 450 W con cable	
Controladoras RAID	Soporte para un máximo de una controladora interna y una controladora externa PERC H730, PERC H730P y PERC H830	
Chipset	Chipset Intel serie C610	
Almacenamiento	SAS, SATA, SAS Nearline, SSD	
Ranuras	Admite hasta 2 x PCIe 2.0 + 4 x PCIe 3.0	
Controladora de Red	2 x 1 GbE, LOMs	

- *Enrutador.* Se encuentran varios dispositivos que están adaptados para tareas IoT, pero nos enfocamos en dos de ellos que se tiene al alcance que es el “F3736 LTE/TD-SCDMA+WIFI ROUTER” [17] y el “ADLINK’s MXE-200/200i” [18]. Estos dispositivos presentan diferentes servicios, como se encuentran referenciados en sus manuales de usuario, y según las necesidades de la agricultura inteligente, se decide utilizar para implementación el F3736 LTE/TD-SCDMA+WIFI ROUTER. La necesidad de trabajar en lugares distanciados y donde las conexiones a internet son muy difíciles, este router tiene la posibilidad de conectarse a través de la red de telefonía móvil por medio de una SimCard, esto posibilita un mejor uso, teniendo en cuenta su capacidad de dispositivos conectados en la red WiFi.
- *Gestores de Sensores.* Para la gestión de los sensores se tiene varias plataformas que ofrecen diferentes servicios y métodos para generar las configuraciones como lo son Raspberrypi [19] y Arduino [20], para saber cuál es mejor en implementación, se evaluaron según el estándar UNE 178 104 (Asociación Española de Normalización) como se hizo en el apartado 5.1. Según la evaluación que se encuentra en el Anexo 2: Evaluación técnica, genera que la plataforma de gestión más adecuada es Rasberry Pi. Los resultados se generaron a partir de la escala de evaluación utilizada en la selección de plataforma como se puede visualizar en la Tabla 1.

2.2 Evaluación de borde (Sensores/Actuadores)

Las variables abajo descritas están dadas por los conceptos básicos de agrometeorología que hacen parte del comportamiento climático: Humedad del suelo, Temperatura del Aire y Humedad Relativa. Estas variables influyen y garantizan el proceso productivo de los cultivos, garantizando las medidas preventivas ante los efectos ocasionados por la naturaleza como lo es la ola inverna (Fenómeno del niño) o la sequía (Fenómeno de la niña) [21].

- *Humedad del suelo.* Es la cantidad de agua por volumen de tierra. Al recibir los rayos del sol que ingresan a la atmosfera son absorbidos por el suelo, haciendo que en los cultivos se genere la germinación, crecimiento y desarrollo de las plantas, así mismo hay que tener en cuenta que el agua es factor determinante en la formación, conservación, fertilidad y productividad de los terrenos [22].
- *Temperatura del aire.* La temperatura es el indicativo del aire con respecto al canje de calor entre el suelo y la atmosfera, tiene importancia en todos los procesos fisiológicos del crecimiento y desarrollo que ocurren en la planta. Estos procesos ocurren entre los 0 y 40 grados Celsius, ya que las plantas requieren para su crecimiento que las temperaturas no presenten valores máximos o mínimos. En cuanto al crecimiento de la planta se limita a dos valores de temperatura: Máximo y mínimo, por fuera de estos dos no se realiza crecimiento de la planta, por ende, el óptimo se encuentra entre estos dos valores [21] - [22].

Los rayos solares que atraviesan la atmosfera son absorbidos por la tierra incrementando la temperatura y por contacto con las capas inferiores de la atmosfera se van transmitiendo este incremento a capas más altas utilizando las corrientes de convección de aire que siempre están presentes en la naturaleza. Así pues, en general las capas bajas de la atmosfera se hallan a mayor temperatura que las situadas encima de ellas y, por tanto, la temperatura del aire, igual que la presión, disminuyen con la altitud [23]. Por lo tanto, se puede determinar que todos los seres vivos necesitan de la energía que pueden extraer de diferentes medios, como es el caso de las plantas que utilizan la energía acumulada en el suelo, para poder nacer, crecer, reproducirse y morir una vez culminado su ciclo reproductivo, todo esto se hace por determinada cantidad de energía denominada grados-día [24].

- *Humedad Relativa.* La humedad es la cantidad de agua que se encuentra presente en la atmosfera en estado gaseoso, esta agua proviene de las dos terceras partes de la tierra (océanos, ríos, lagos) los cuales generan la humedad [25]. Ahora bien, la humedad es originaria de la condensación del agua generada por el cambio termodinámico entre el suelo y la atmosfera, haciendo que se genere el ciclo del agua. De esta manera se eleva el agua de los ríos, lagunas y mares para generar las nubes, quienes son las distribuidoras de agua en los cultivos [25].

La resolución de humedad del suelo es primordial para solucionar las necesidades hídricas que tienen las plantas, esto con el fin de mantener la planta en un estado óptimo. Lo anterior es lo deseado en los cultivos, pero hay terrenos que no cumplen estos parámetros, haciendo que se generen sistemas de riego [26]. Según lo anterior, procedemos a realizar un cuadro de comparación de las variables y los sensores que vamos a utilizar para la posterior implementación de nuestro sistema IoT en agricultura (Tabla 4), donde vemos que el soporte para nuestra plataforma de uso (Grafana) es importante para realizar nuestras mediciones de campo y tomar conclusiones más adelante.

Tabla 17. Cuadro de comparación variables – sensores

Variable	Sensor	Precio	Características	Soporte
Humedad Suelo	DHT22	\$ 20.000	DHT22	Grafana, ThingerIO
Temperatura Aire	DHT22	\$ 20.000	DHT22	Grafana, ThingerIO
Humedad Relativa	LM393 + SEN0114	\$ 7.000	LM393+	Grafana, Raspberry PI

3. RESULTADOS

Para el diseño de nuestra estación base utilizamos el software online de Autodesk llamado TinkerCAD [27], el cual tiene librerías de circuitos electrónicos donde se pueden ubicar varios diagramas y modelarlos en 3D (Figuras 3 a 5)), por lo tanto, este software es de gran utilidad al ser gratuito y nos deja realizar el guardado de cada elemento por separado para ser impreso en 3D o posteriormente cortado en máquinas idóneas para este proceso. En primera instancia utilizamos el diagrama de Raspberry Pi en 3D para fabricar nuestra caja a medida y luego utilizamos la herramienta (TinkerCAD) para diseñar nuestros sensores desde cero ya que estos sensores no están implementados aun en la herramienta, luego diseñamos una caja donde van a estar ubicados nuestros dispositivos para la medición.

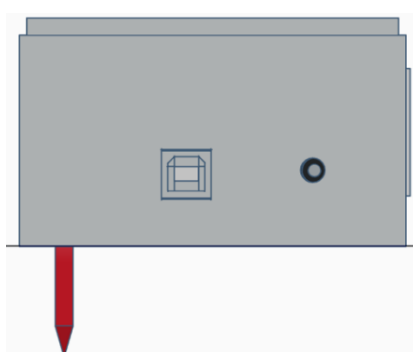


Figura 3. Vista frontal de la estación base

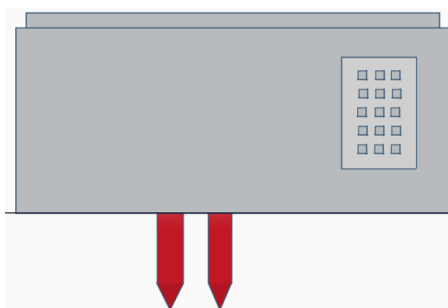


Figura 4. Vista lateral de la estación base

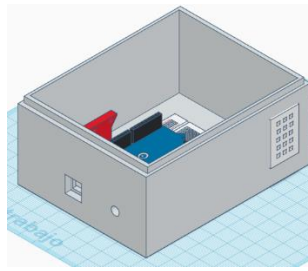


Figura 5. Vista isométrica de la estación base

En el manual de usuario, se encuentra la guía paso a paso acerca de la implementación, utilización y complementos (APIs) que se hicieron en Grafana, como también se puede visualizar el resultado de mediciones hechas por los sensores que se implementaron. Las pruebas realizadas se componen de dos partes, la primera es en red local y la segunda parte con salida y almacenamiento en la nube. A continuación, en la Figura 6 se muestra la topología de red implementada de red local.

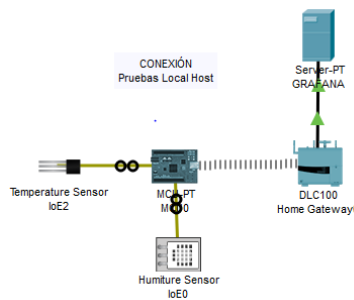


Figura 6. Topología de red local

En primera instancia se hace la verificación de conectividad en la red, en la Raspberry se monta la configuración que se menciona en la sección de implementación en el borde, teniendo en cuenta que se hace verificación de funcionamiento del sensor y las librerías que se instalan para correr el código que hará el envío de la información. En la Figura 7 se muestra la verificación de recepción de la información en nuestra red local.

```

c5889f5b 95857
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:00 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 076c0014-202e-11e9-8025-001
c5889f5b 47170
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:13 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 0b328aa1-202e-11e9-8026-001
c5889f5b 47785
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:19 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 0e8a026e-202e-11e9-8027-001
c5889f5b 190649
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:25 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 11f485f8-202e-11e9-8028-001
c5889f5b 60688
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:30 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 154ca31d-202e-11e9-8029-001
c5889f5b 126026
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:36 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 18b0085d-202e-11e9-802a-001
c5889f5b 78975
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:42 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 1c09e1af-202e-11e9-802b-001
c5889f5b 68637
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:47 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 1f603244-202e-11e9-802c-001
c5889f5b 48269
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:53 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 22b78d6e-202e-11e9-802d-001
c5889f5b 41883
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:16:59 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 260dc787-202e-11e9-802e-001
c5889f5b 77657
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:17:07 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 2aecd1c7-202e-11e9-802f-001
c5889f5b 38748
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:17:12 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 2e4eefc9-202e-11e9-8030-001
c5889f5b 28978
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:17:18 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 31a22c04-202e-11e9-8031-001
c5889f5b 82169
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:17:24 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 34f72721-202e-11e9-8032-001
c5889f5b 75588
[httpd] 192.168.1.72 - rp13 [24/Jan/2019:18:17:29 -0500] "POST /write7db-sensor_data HTTP/1.1" 204 0 "-" "python-requests/2.21.0" 3859a7fd-202e-11e9-8033-001

```

Figura 7. Prueba de reporte de datos en InfluxDB

Tras asegurar el correcto envío de la información al motor de datos, nos dirigimos a la plataforma de Grafana para visualizar y generar las alertas de las anomalías relacionadas con las variables medidas. En la Figura 8 se muestran los datos recolectados por varios días.

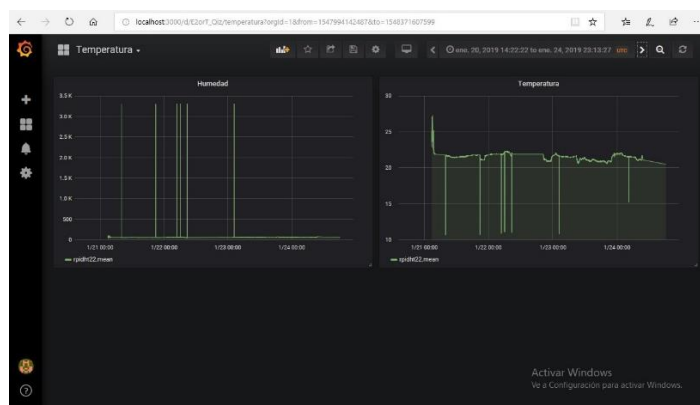


Figura 8. Dashboard de Grafana con los datos recolectados

Lo anterior nos brinda seguridad sobre nuestra implementación. En la Figura 8 se contempla la implementación del mismo modelo en una red de datos de cobertura extendida.

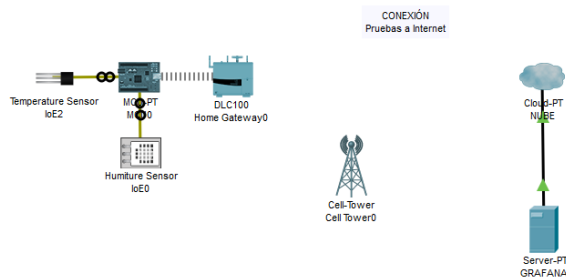


Figura 9. Topología de red - pruebas a Internet

La anterior figura nos muestra la topología que tiene nuestras pruebas de salida a internet. En este caso se hizo uso de una IP pública con asignación de puerto, Permitiendo una correcta gestión de la información. Lo anterior se realizó con la colaboración del laboratorio de redes de la Institución Universitaria Politécnico Gran Colombiano, en la cual se tiene una red interna que se puede acceder desde Internet. En la Raspberry (Figura 10) se modificó el script, la IP y puerto de red local por una IP publica asociado a un dominio y puerto designado, así mismo conectándola a internet compartido por un celular.

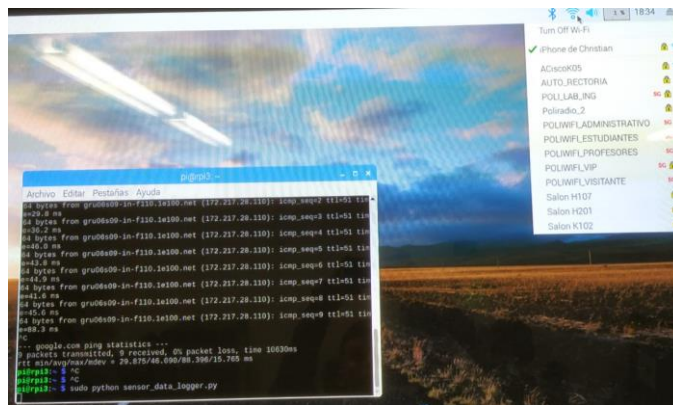


Figura 20. Conexión fuera de red local en Raspberry

Ahora, en el servidor se hace la configuración de IP de la red interna con vista desde Internet. Pero para que la información pueda llegar a nuestro motor de datos se debe hacer una pequeña configuración en el Router que tiene esta red. En la configuración del Router, se genera una traducción de puerto para que el puerto interno sea distinto al puerto externo. Se comprueba que InfluxDB si está recibiendo la información desde Internet (Figura 11).

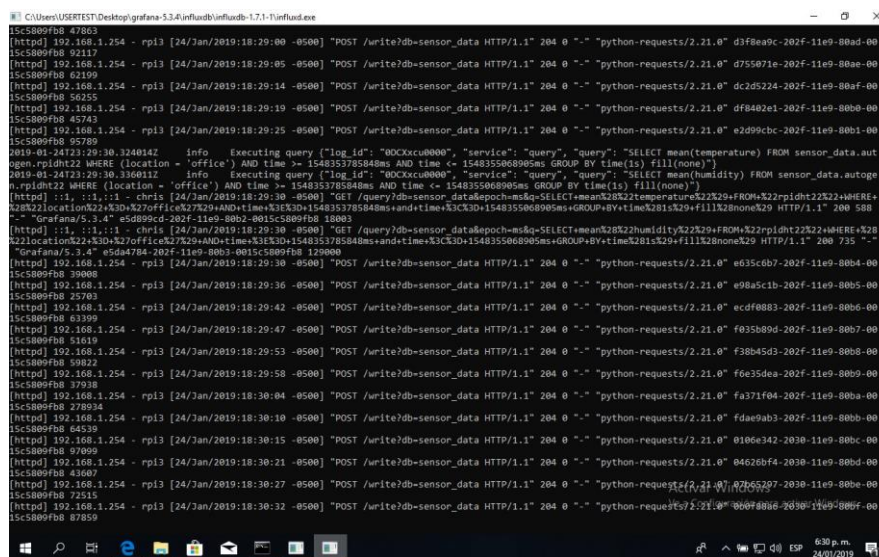


Figura 31. Reporte de datos desde internet a Influxdb

Como podemos ver, la información es reportada por la IP 192.168.1.254 que es la puerta de enlace del DNS del router que está asociada a la IP pública. Por consiguiente, se verifica en Grafana como se muestra en la Figura 12. Como se puede apreciar, al unir la hora y fecha de InfluxDB con el Dashboard de Grafana están en la misma fecha y hora.



Figura 42. Dashboard de datos reportados de Internet

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. *Prototipo.* En el caso del prototipo se tienen varios aspectos positivos en los cuales se enmarcan en económicos, movilidad y adaptabilidad en entornos agrícolas. El aspecto económico tiene en cuenta una dinámica que nos permite la metodología al evaluar diferentes plataformas y módulos adaptables según la necesidad de cada cultivo en términos económicos. La movilidad del prototipo se da a partir de la concepción de compactar todo en el mismo lugar (estación base), generando un uso eficiente con respecto a las necesidades que pueden tener los cultivos a través del tiempo. La adaptabilidad que tiene el prototipo está en términos de modularidad para las mediciones que se generan en cada uno de los sensores que pueden cambiar según las necesidades del cultivo. En el escenario de pruebas en el cual se evaluó el funcionamiento prototipo no se tuvieron en cuenta el consumo energético generado por la plataforma y los módulos, así mismo la resistencia del prototipo a las condiciones ambientales que se pueden generar en un cultivo.
2. *Metodología de implementación.* La metodología de implantación ayudo de manera positiva en la unificación de una normal internacional para la implementación de arquitecturas IoT con la definición de una escala de valoración funcional, así mismo puede ser utilizada en otras áreas de aplicación de IoT como lo son las SmartCity entre otros. Al unificar una norma de evaluación para la metodología de implementación en la arquitectura IoT se tiene una clara parametrización, haciendo que el resultado obtenido sea el esperado, así mismo el proceso de evaluación es adaptable a otros ambientes IoT como lo son un ambiente local, SmartCity o la misma agricultura inteligente. La evaluación de metodología se utilizó una escala de medición generada por el mismo grupo investigador, haciendo que sea funcional. En el proceso de mejoras que se deben tener en cuenta al momento de aplicarlo en otros escenarios es el contraste con diferentes normas, estas pueden varias según las leyes del país o el entorno y las restricciones técnicas que pueden el entorno, estas pueden ser sociales, culturales entre otras.
3. *Servicios en la nube.* Los servicios en la nube tienen varias prestaciones positivas en las que destacan la plataforma, generando que los motores de datos sean independientes a la plataforma de visualización, el soporte y manual funcional. La dinámica del código abierto hace que el desarrollo en motores de datos sea independiente del visualizador de datos, así mismo se pueden utilizar diferentes herramientas como lo son MySQL, InfluxDB, AWS CloudWatch entre otros; haciendo que le soporte que se presta sea más amplio, por la comunidad de desarrolladores que tiene cada una de estas empresas que tienen estos servicios y las afectaciones generadas solo se den en cierta parte del proyecto y no afecten la funcionalidad de la plataforma. La plataforma por su parte tiene un desarrollo independiente que genera el máximo de aprovechamiento de la información generada por los módulos del prototipo. El manual generado hace que sea una herramienta utilizable para cualquier persona y sea una herramienta de apoyo para la Institución Universitaria Politécnico Gran Colombiano.

5. CONCLUSIONES

- Se utilizó una metodología estandarizada en la búsqueda de un entorno adaptable a cualquier aplicación IoT.
- El dinamismo de Grafana con diferentes APIs permite una mejor interacción y distribución de la información.
- El soporte de Grafana en diferentes protocolos, permite mejores soluciones ante diferentes escenarios.
- La versatilidad de Raspberry Pi nos permite que la gestión de la plataforma sea integra en soporte y disponibilidad.

REFERENCIAS

- [1] J. J. Perfetti, J. Botero, S. Oviedo, D. Forero, S. Higuera, M. Correa y J. García, «Política comercial agrícola: nivel, costos y efectos de la protección en Colombia,» Editorial EAFIT, Bogotá, 2017.
- [2] É. Tovar Martínez, «Lo que tiene en jaque al agro colombiano,» El tiempo, 07 septiembre 2013.

- [3] Departamento Nacional de Planeación (DNP), «El campo colombiano: un camino hacia el bienestar y la paz,» Bogotá, 2015.
- [4] L. A. Muñoz Wilches, «Asistencia técnica al desarrollo tecnológico del sector agropecuario a nivel nacional,» Bogotá, 2010.
- [5] I. I. d. C. p. l. A. IICA, «El fenómeno del niño en la agricultura de las Américas,» San Isidro, Costa Rica, 2016.
- [6] Ministerio de agricultura y desarrollo rural, «Federación Nacional de Comerciante "Fenalco",» noviembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.fenalce.org/archivos/cartillanino.pdf>. [Último acceso: 28 Julio 2018].
- [7] J. I. Rodríguez Molano, C. E. Montenegro Marín y J. M. Cueva, «Introducción al internet de las cosas,» Revista Universidad Distrital Francisco José de Caldas, vol. 6, n^o Edición Especial, pp. 53 - 59, 2015.
- [8] E. Pérez Correa y M. Pérez Martínez, «El sector rural en Colombia y su crisis actual,» Cuadernos de desarrollo Rural, vol. 48, pp. 36 - 58, 2002.
- [9] G. Satell, «DigitalTonto,» 12 marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.digitaltonto.com/2017/how-every-industry-can-learn-from-the-open-source-movement/>. [Último acceso: 23 09 2018].
- [10] J. J. Manotas Campos y N. Martínez Marín, «Exploración de las plataformas lot en el mercado para fomentar el conocimiento, buen uso y efectividad de los dispositivos iot creados en la facultad de ingeniería y ciencias básicas de la institución universitaria Politécnico Grancolombiano,» Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano, Bogotá, Colombia, 2018.
- [11] Microsoft, «Microsoft Azure,» Microsoft, 02 2010. [En línea]. Available: <https://docs.microsoft.com/es-es/azure/iot-fundamentals/>. [Último acceso: 15 09 2018].
- [12] L. KaaloT Technologies, «KAA,» CyberVision, Inc., 2014. [En línea]. Available: <http://kaaproject.github.io/kaa/docs/v0.10.0/Welcome/>. [Último acceso: 10 09 2018].
- [13] Thingier.io, «Thingier.io Platform» Thiger.io, 2015. [En línea]. Available: <https://thingier.io/>. [Último acceso: 09 09 2018].
- [14] Grafana Labs, «Grafana,» Grafana Labs, [En línea]. Available: <https://grafana.com/>. [Último acceso: 20 08 2018].
- [15] Asociación Española de Normalización, «UNE "Normalización Española",» 2017. [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0059471>. [Último acceso: 10 septiembre 2018].
- [16] oneM2M, «ETSI,» 2018. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/118100_118199/118101/02.10.00_60/ts_118101v021000p.pdf. [Último acceso: 15 Septiembre 2018].
- [17] Xiamen Four-Faith Communication Technology Co., Ltd., «F3X36 Series Router User Manual» Xiamen, China, 2014.
- [18] ADLINK Technology, Inc., «Fanless Embedded Computer - User's Manual» Distrito Zhonghe Nueva Ciudad de Taipei, Taiwán, 2014.
- [19] Fundación Raspberry PI, «Raspberry Pi,» Fundación Raspberry PI, [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org>. [Último acceso: 01 12 2018].
- [20] Ardiono, «Arduino,» Arduino.cc, [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Último acceso: 10 8 2018].
- [21] H. F. Mafla Ch, D. Moreno Cepero y G. d. a. IDEAM, manejo e interpretación de variables del clima y de agrometeorología desde la finca del agricultor, ante los efectos de la ola invernal, Bogotá, Colombia: Produmedios, 2011.
- [22] GLOBE, «Protocolo de Temperatura del Suelo,» GLOBE, Estados Unidos, 2005.
- [23] MeteoLobios, «MeteoLobios,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.meteolobios.es/temp.htm>. [Último acceso: 20 09 2018].
- [24] Instituto Nacional de Investigacion Agropecuaria Uruguay, «INIA,» 27 mayo 2003. [En línea]. Available: http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/le/cc_tempe.htm. [Último acceso: 25 09 2018].
- [25] ConceptoDefinicion.de, «Concepto Definicion,» 8 junio 2017. [En línea]. Available: <https://conceptodefinicion.de/agricultura-secano/>. [Último acceso: 21 09 2018].
- [26] T. Reyna, S. Reyna, M. Lábaque, F. Fulginiti, C. Riha y J. Linares, «Importancia de la determinación de la humedad en estudios de infiltración y escorrentía superficial para períodos largos,» An Interdisciplinary Journal of Applied Science, vol. 6, n^o 2, pp. 91-110, 2011.
- [27] Autodesk, Inc., «Tinkercad» Autodesk, Inc., 2018. [En línea]. Available: <https://www.tinkercad.com/#/>. [Último acceso: 15 10 2018].

Plan de acción para un Laboratorio de Soluciones Tecnológicas a nivel de educación superior: Caso facultad de ingeniería de la Universidad de Medellín

Liliana González P.¹

Mario A. Luna del R.²

Mauricio González P.³

Jenny Cuatindioy I.⁴

Universidad de Medellín – Colombia

La siguiente investigación se fundamenta a partir de una iniciativa de las Facultades de Ingeniería y Comunicación de la Universidad de Medellín (UdeM), apoyados por la Unidad de emprendimiento y Desarrollo Empresarial, que busca generar un espacio de experimentación aplicada donde se desarrollen metodologías de enseñanza basadas en la solución de problemas. Dicha metodología contará adicionalmente con el acompañamiento necesario para dar soporte a las iniciativas generadas por los estudiantes desde los proyectos de aula y que sean susceptibles de convertirse en emprendimientos o casos de innovación, inicialmente en las áreas de tecnología y comunicación. El proyecto denominado Laboratorio de Soluciones Tecnológicas (LST) unirá los esfuerzos que en materia de desarrollo tecnológico abarque desde lo técnico hasta el contenido, pasando por el diseño, la gestión de contenido, y la divulgación. El LST permitirá a profesores de la institución, a partir de la experimentación y el ensayo-error asumidos como metodologías de la investigación aplicada, lograr resultados académicos de impacto que conlleven a completar la cadena de valor de los desarrollos concebidos en las aulas y llevarlo a la generación de impacto social, tendiente a proveer de soluciones innovadoras a la ciudad, revelados en desarrollos, patentes, técnicas, tecnología, emprendimientos y casos reales desde la Universidad.

1. INTRODUCCIÓN

En su lema de Ciencia y Libertad, la Universidad de Medellín tiene como misión la promoción de la cultura y la formación integral de profesionales que contribuyan a la solución de problemas en las áreas de los saberes propios, mediante la docencia, el fomento de la investigación y la interacción con la sociedad. Para lograrlo, la educación de la institución se fundamenta en un modelo pedagógico cuyo objetivo es ofrecer una enseñanza libre, sin limitaciones por razones políticas, raciales o de otro orden y fomentar la cultura investigativa orientada a buscar la solución de los problemas colombianos. Buscando materializar el modelo pedagógico, se emplean técnicas y metodologías de aprendizaje activo donde se potencia el trabajo cooperativo y colaborativo, la co-creación. Las nuevas estrategias generan motivación en los estudiantes hacia la búsqueda y la producción de conocimientos y capacidades emprendedoras, beneficios en los procesos de aprendizaje y desarrollo personal, sentimientos de satisfacción, orgullo frente a los resultados alcanzados, acercamiento de los estudiantes a las realidades del entorno y fortalecimiento de los vínculos de la universidad a la empresa.

Estas nuevas metodologías requieren espacios diferentes donde los estudiantes y docentes puedan desarrollar su creatividad, incentivar el emprendimiento, ejecutar proyectos, y encontrar la mejor forma de interactuar con casos de la vida real. Derivado de las necesidades ya planteadas surge el Laboratorio de Soluciones Tecnológicas -LST- cuyo objetivo es facilitar un lugar para la experimentación y aplicar metodologías de enseñanza adicionales que soporten el modelo pedagógico de la Universidad de Medellín basado en la “solución de problemas”. Así mismo, se busca ofrecer a los estudiantes el acompañamiento necesario para que las iniciativas generadas desde los proyectos de aula puedan ser susceptibles de convertirse en emprendimientos o casos de innovación. Los fundamentos antes descritos requieren a su vez del desarrollo de algunas características esenciales en los currículos de diversos programas de formación, en especial en los programas de ingeniería, tales como:

- *Pertinencia*: se refiere a la preparación del estudiante para asumir responsabilidades en un mundo de transformación, a adquirir visión crítica y actitud orientada a la apropiación de problemas y al compromiso responsable de su solución
- *Practicidad*: donde se proporciona al alumno conocimientos teóricos vinculados con la práctica de manera permanente en todas las áreas del conocimiento
- *Flexibilidad*: la Universidad articula técnicas de enseñanza y aprendizaje revolucionadoras que garanticen en los estudiantes el desarrollo de actitudes investigativas, habilidades para el trabajo en equipo, la toma de decisiones, la creatividad, el liderazgo, la interdisciplinariedad y la relación con la realidad contextual, entre otros.

Pero toda gran iniciativa debe tener un direccionamiento estratégico. En este capítulo se presenta el plan de acción, instrumento que materializa la estrategia previamente definida para el Laboratorio de Soluciones Tecnológicas de la UdeM. Con esto se busca impactar positivamente el proceso de formación de los estudiantes a partir de los proyectos

¹ lgonzalez@udem.edu.co

² mluna@udem.edu.co

³ magonzalez@udem.edu.co

⁴ jecuantindioy@udem.edu.co

de aula, semilleros y otros esfuerzos conectados con necesidades del entorno, y que puedan derivar en productos y servicios innovadores. Se muestran también algunos resultados preliminares al ejecutar algunas estrategias mencionadas. Como conclusión se evidencia que la integración en el aula de proyectos reales genera mayor motivación en los estudiantes y los lleva a usar de manera voluntaria.

2. MÉTODO

La metodología de aprendizaje del Laboratorio de Soluciones Tecnológicas que se plantea en la presente investigación se basa en un currículo atravesado por competencias generales, comunes y específicas. En ella, se materializa el proceso de aprendizaje en cada espacio donde se comunican los saberes mediante didácticas fundamentadas en la modelación de los procesos universales de construcción de los conocimientos, bajo el enfoque de la investigación formativa, para que, a través de la solución de problemas locales y globales, se obtengan resultados académicos producto de la evaluación de los aprendizajes. En esta dinámica se hace, entonces, necesario acercarse a los estudiantes al mundo real, al relacionamiento con la empresa para conocer de primera mano sus problemas y necesidades y fomentar cultura hacia el emprendimiento y la creación de empresa como responsabilidad social del ciudadano en la generación de empleo y estabilidad de una ciudad sostenible.

Para facilitar esta tarea se vienen desarrollando y aplicando, con grandes resultados, técnicas y metodologías tales como el aprendizaje y trabajo cooperativo y colaborativo, co-creación, transmediación, convergencia y *Living Labs* (laboratorios vivos), entre otros. Estas técnicas generan como resultado, motivación en los estudiantes hacia la búsqueda y la producción de conocimientos y capacidades emprendedoras, beneficios en los procesos de aprendizaje y desarrollo personal, sentimientos de satisfacción, orgullo frente a los resultados alcanzados, acercamiento de los estudiantes a las realidades del entorno y fortalecimiento de los vínculos de la universidad a la empresa.

Enfocando el proceso de aprendizaje de acuerdo a esta metodología se espera que en el trabajo cooperativo los alumnos sean quienes diseñan su estructura de interacciones y mantengan el control sobre las diferentes decisiones que repercuten en su aprendizaje, donde se requiere de una división de tareas entre los diferentes componentes del grupo, mientras que en el trabajo colaborativo, es el profesor quien diseña y mantiene casi por completo el control en la estructura de interacciones y de los resultados que se han de obtener. La metodología experimental conduce a la formulación analítica del proceso de entendimiento de las nuevas tendencias para obtener desde la práctica, conocimiento nuevo desde la investigación aplicada de los procesos de desarrollo propios de la ingeniería. De acuerdo a lo anterior, se planteó el siguiente plan de acción que se diseñó siguiendo los pasos indicados en la Figura 1.

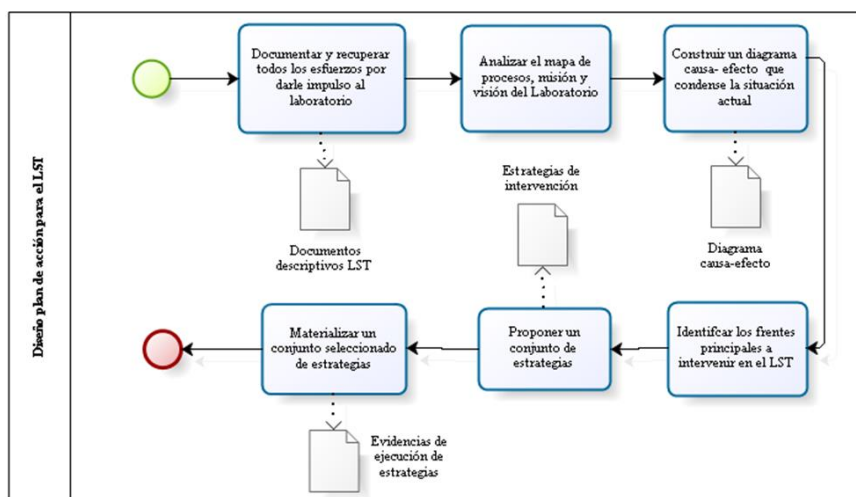


Figura 1. Plan de acción para el Laboratorio de Soluciones Tecnológicas

Para la correcta ejecución del plan de acción del LST se plantea un mapa de procesos que consta de tres direccionamientos:

1. *Estratégicos*: son aquellos vinculados al ámbito de las responsabilidades de los directivos. Su ejecución normalmente es a largo plazo. Involucran procesos de planificación y otros ligados a factores clave o estratégicos para la unidad de negocio.
2. *Misionales*: están ligados directamente al quehacer del LST, es decir, la formación en innovación y la conversión de ideas en productos/servicios potencialmente comercializables, todo lo anterior al servicio de la academia.
3. *De apoyo*: hacen referencia al soporte que requieren los procesos misionales y estratégicos. Se suelen referir a procesos relacionados con gestión de recursos, procesamiento de información, y en general, procesos que son ejecutados por personal operativo y que no están directamente ligados al “core” del negocio.

Para el direccionamiento estratégico se considerarán: i) la comunicación estratégica, donde se pretende impactar al nivel directivo de la Universidad buscando el acompañamiento necesario para darle fuerza a esta iniciativa, y mayor compromiso de todos los involucrados, y ii) la planeación estratégica, donde se formulan, implantan y evalúan decisiones inter-funcionales que permitan a la organización llevar a cabo sus objetivos e identificar sus fortalezas en el saber hacer específico de los programas de ingeniería de la UdeM.

Para el direccionamiento misional, se consideran las etapas de maduración de las ideas desde su planteamiento, pasando por el desarrollo y validación hasta el lanzamiento al mercado. También se considerarán procesos transversales tales como la formación en innovación, captación y evaluación de ideas y proyectos, gestión de proyectos de I+D+i, el conocimiento del entorno e inteligencia competitiva y los procesos de mejora continua.

En lo que concierne al direccionamiento de apoyo, se propone fortalecer los mecanismos que direccionen a una mayor producción científica de los resultados de investigación, formalización de la propiedad intelectual tanto de los estudiantes como de los profesores e investigadores de la Facultad, integración con unidades de negocio del ecosistema de emprendimiento de la institución y de la ciudad, administración de recursos clave para el desarrollo de los proyectos donde se consideraran el patrocinio y la financiación ya sea por la institución o empresas interesadas.

3. RESULTADOS

El Laboratorio de Soluciones Tecnológicas de la Universidad de Medellín ha pasado transicionalmente por diferentes momentos desde su constitución en el 2014, donde se identificaron y se describen cinco momentos principales (Figura 2) que vislumbran las principales fortalezas, debilidades y oportunidades que tiene dicho espacio.



Figura 2. Momentos principales del Laboratorio de Soluciones Tecnológicas

3.1 Consolidación y solicitud de recursos a la administración de la universidad

La propuesta para la creación del Laboratorio de Soluciones Tecnológicas, LST, nace de una iniciativa entre las Facultades de Ingeniería y Comunicación, quienes a su vez contaban con el apoyo de la Unidad de emprendimiento y Desarrollo Empresarial. La propuesta de creación del LST planteaba como objetivo generar un espacio de desarrollo y experimentación bajo el modelo de desarrollo de prototipos, donde se fundamentaban metodologías de enseñanza dinámicas alineadas con el modelo pedagógico de la Universidad de Medellín - "solución de problemas". El documento también plantea el acompañamiento necesario a las iniciativas generadas por los estudiantes y/o profesores desde las fases más básicas (idea/concepto) hasta el estudio de oportunidad para la conformación de empresas de base tecnológica. Cada iniciativa se evaluaría pasando por el diseño, la gestión de contenido, y la divulgación. Otro de los compromisos planteados por el LST, en el momento de su consolidación, fue el de generar impacto social a través del planteamiento de soluciones innovadoras a la ciudad, revelados en desarrollos, patentes, técnicas, tecnología, emprendimientos y casos reales desde la Universidad.

3.2 Adecuación de espacios y puesta en marcha del LST

El Laboratorio de Soluciones Tecnológicas enfrentó varios desafíos durante el proceso de adecuación de espacios y puesta en marcha. A continuación, se realiza una breve descripción de los mismos:

- *Definición del espacio:* Al ser un espacio de interés común para los estudiantes de las Facultades de Ingeniería y Comunicación, debía contar con todas las exigencias de conectividad y a su vez, garantizar la seguridad de los elementos tecnológicos previstos para su compra. En varias reuniones con personal directivo de la institución, se definió que el Centro de Laboratorios de la UdeM contaba con todos los elementos necesarios para la instalación de los equipos de cómputo, garantizando a su vez la conectividad de los mismos, y herramientas de prototipado del LST.
- *Disponibilidad del espacio:* La ocupación del Centro de Laboratorios de la UdeM para procesos de investigación y prácticas de laboratorio de los estudiantes de ingeniería es muy alto, por lo tanto, los coordinadores del espacio junto con los decanos y el jefe del Centro de Laboratorios, identificaron, luego de un proceso riguroso de búsqueda, un aula de prácticas para los estudiantes de telecomunicaciones que estaba siendo subutilizado. Los equipos tecnológicos que se utilizaban en dicho espacio se reubicaron, liberando así el espacio actual que tiene en LST.

- **Instalación de equipos:** La totalidad de los equipos de cómputo del LST fueron instalados y puestos en funcionamiento por la división de informática de la institución. La participación de dicho departamento permitió instalar el software requerido para las labores básicas del espacio, con herramientas tales como la suite Office. Para algunos equipos se adecuo la suite Adobe para la posterior utilización de los estudiantes de la Facultad de Comunicación. En el caso de la impresora 3D y las impresoras de papel, la instalación se realizó directamente por parte de los proveedores y los coordinadores del espacio.
- **Adecuación de requerimientos de conectividad:** La conectividad de los equipos de cómputo del LST es uno de los principales obstáculos que tiene el espacio. Solo uno de los terminales de comunicación del espacio se encuentra activo, lo que limita la utilización apropiada de los demás equipos. Dentro de la solicitud de compras de los equipos del LST, se adquirió un router inalámbrico que distribuye la señal de internet para los demás computadores. Cuando el LST se encuentre con alta afluencia, los equipos se ralentizan perturbando los desarrollos de los profesores y estudiantes.
- **Capacitaciones:** Para el caso particular de la impresora 3D y los computadores de placa reducida (Arduinos y Raspberry Pi), los proveedores de dichos componentes ofrecieron capacitaciones básicas de uso. Las principales competencias de uso de dichos equipos dependen principalmente de cursos complementarios, tutoriales y desarrollos experimentales que se realicen en el desarrollo de las clases.

3.3 Ingreso de proyectos y estudiantes

El Laboratorio de Soluciones Tecnológicas cuenta con un esquema de trabajo colaborativo entre diferentes dependencias de la Universidad de Medellín, el cual se divide en dos grandes etapas: 1) proceso académico, y 2) ecosistema de innovación y emprendimiento. El proceso académico se da en el ejercicio docente del aula de clase, en donde a partir de la metodología de proyecto de aula que parte de la investigación formativa, algunas materias tienen la posibilidad de tener como producto propuestas de desarrollos tecnológicos o de contenidos con potencial para llevarse a la etapa de prototipado. En esta etapa, los coordinadores del LST, con el apoyo de profesores de las diferentes asignaturas propias de cada facultad realizan una selección preliminar de los proyectos con mayor potencial de innovación. Estos proyectos son los resultados de trabajos de grado, semilleros, proyectos de aula, asignaturas de libre elección, y trabajos de egresados de las Facultades de Ingeniería y Comunicación (Figura 3). Los pre-proyectos más sobresalientes identificados en esta etapa, ingresan al Ecosistema de Innovación y Emprendimiento por recomendación de los docentes involucrados en cada una de las entradas.

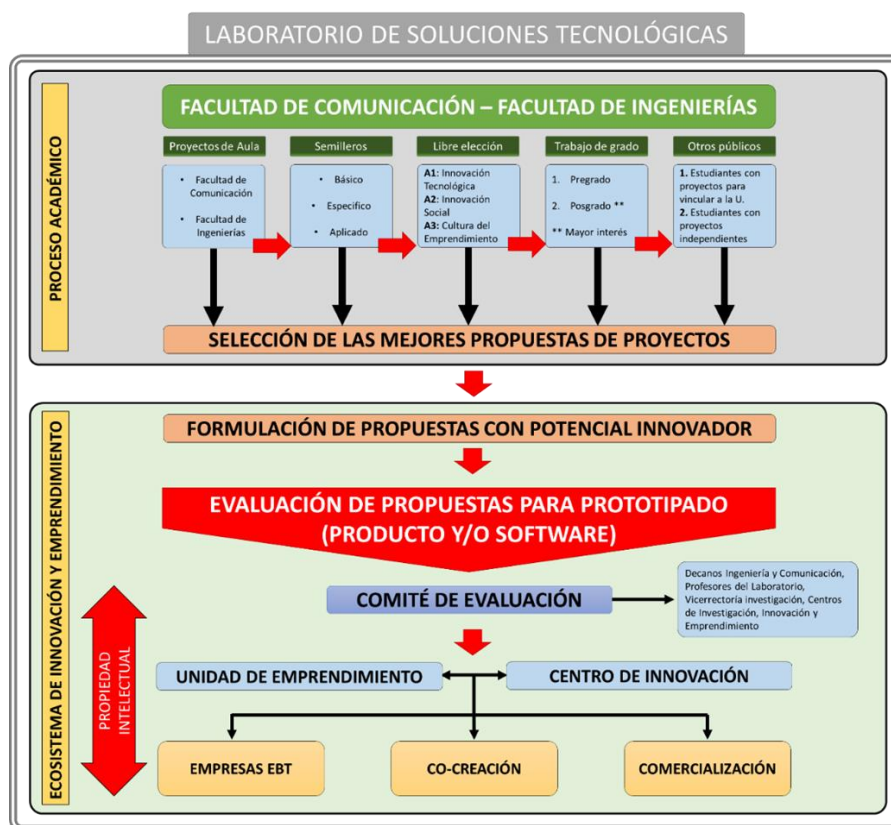


Figura 3. Esquema de trabajo del Laboratorio de Soluciones Tecnológicas

En la segunda etapa del esquema de trabajo del LST, el Centro de Innovación y la Unidad de Emprendimiento de la Universidad de Medellín, realizan una valoración de las tecnologías presentadas por las Facultades. Dicho proceso

cuenta con el soporte técnico y científico de un comité de evaluación conformado por los decanos de las Facultades de Ingeniería y Comunicación, los coordinadores del LST, la Vicerrectoría de Investigación y los Centros de Investigación, Innovación y Emprendimiento. Las propuestas que ingresan en el Ecosistema de Innovación y Emprendimiento, deben formular sus respectivas propuestas de proyecto, de acuerdo a las pautas y formatos establecidos por la Universidad, lo que facilita el proceso de evaluación y validación. De igual forma, los proyectos seleccionados, deben definir su participación y compromisos económicos con la Universidad de Medellín, esto con el fin de llegar a acuerdos entre ambas partes de acuerdo a los términos y condiciones de la propiedad intelectual que deriven en productos y/o software.

Como resultado del presente esquema de trabajo, los proyectos son incubados por el Centro de Innovación y la Unidad de Emprendimiento de la UdeM para su fortalecimiento con miras a la conformación de unidades empresariales independientes, spin-off, empresas de base tecnológica (EBT), o para comercializar las tecnologías identificadas.

3.4 Construcción de guía de intervención para mejorar la operación del LST

Al revisar los indicadores del laboratorio con su modo actual de funcionamiento se detecta que hacen falta ajustes importantes, por lo tanto, se asume el reto de proponer una nueva forma de organización. Para lograrlo se destinan esfuerzos importantes. Un primer paso es la participación de aproximadamente 17 docentes en el “curso Formación de Formadores” que busca desarrollar la cultura de innovación en los profesores con miras hacia su despliegue en cursos de diferentes programas de pregrado. Un segundo paso es el diseño de la metodología y ruta de intervención a seguir en la Facultad de Ingeniería para el Laboratorio de Soluciones Tecnológicas, que permita escalar, madurar y consolidar productos y servicios comercializables que surgen a partir de los proyectos de aula, semilleros u otros con alto potencial.

3.5 Situación actual del LST

Desde el 2016-1, el Laboratorio de Soluciones Tecnológicas de la UdeM opera principalmente con proyectos de aula de estudiantes de las Facultades de Ingeniería y de Comunicación que realizan en el marco de diferentes proyectos. Los equipos de cómputo y la impresora 3D de prototipado rápido son los equipos más utilizados del espacio. Sin embargo, los resultados de dichos proyectos en las aulas no son posteriormente compartidos con el laboratorio, ni considerados por comités evaluadores que les permitan seguir mejorando los conceptos. Por otro lado, algunos estudiantes han acudido al LST, de forma voluntaria, con el fin de compartir sus ideas y poder afinar los conceptos de sus desarrollos. Sin embargo, el proceso de desarrollo de las ideas, en el caso particular de soluciones informáticas, se ha tornado complicado debido a la falta de estudiantes desarrolladores (sistemas) en el laboratorio.

Otro caso de éxito es la acogida de estudiantes de universidades extranjeras (ej.: Universidad Politécnica de Sinaloa), quienes hacen uso del espacio periódicamente (4 meses durante el año) con el fin de desarrollar sus trabajos de grados. Hasta el 2019, el LST ha acogido a más de 300 estudiantes donde se ha obtenido 14 registros de software, avalado 18 trabajos de grado, 4 patentes de invención, y varios desarrollos tecnológicos. Igualmente, en la Tabla 1 se relacionan algunos proyectos desarrollados en el LST por la Facultad de Comunicación. Atendiendo la metodología indicada en la sección anterior, el insumo inicial fue el diagrama causa-efecto de la Figura 4 [2], [3]. Una vez identificados los puntos críticos se procedió a estructurar un plan de acción para dinamizar el LST [4]. También se generó un conjunto de acciones inmediatas a ejecutar en el corto plazo [5]. Algunas de estas acciones ya se ejecutaron con evidencias de resultados obtenidos. En cuanto al plan de acción se propone intervenir los frentes representados en la Figura 5. En la Tabla 2 se despliegan algunas de las estrategias propuestas para dinamizar el laboratorio.

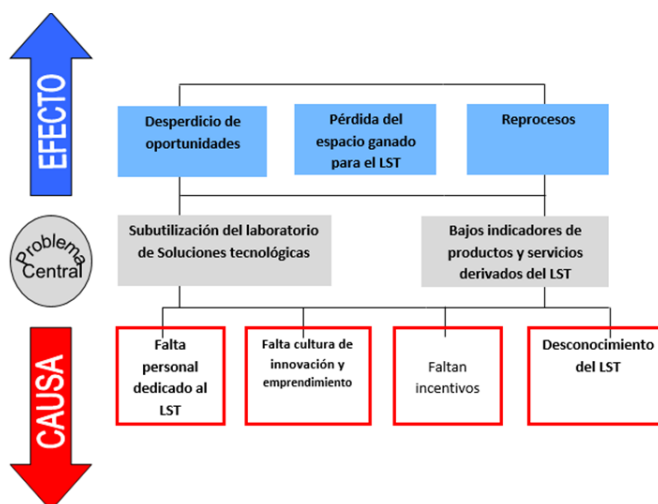


Figura 4. Diagrama causa-efecto de las acciones a realizar en el LST

Tabla 1. Referencias de proyectos desarrollados en el Laboratorio de Soluciones Tecnológicas

Producto/ Marca	Líder Proyecto	Tipo	Estado producto	Estado marca	Necesidades
Geomapp	Coordinador de PRAU y Docente	App	APP Ruta turística por desarrollar	Marca otorgada	Ingeniero, programador, diseñador, comunicador contenidos.
Koobe Books	Coordinador de PRAU y Docente	App/Libro digital	Ya hay libros digitales, no se encuentran en el LST	Requerimiento	Recuperar libros digitales con docente Oscar González, Diseñador, compilador corrector de estilo, programador, comunicador contenidos.
Blink 3D	Coordinador de PRAU y Docente	Desarrollo tecnología	no hay diseños, manuales o productos	Negada	Ingeniero, programador, diseñador, comunicador contenidos.
WetPix	Coordinador de PRAU y Docente	Evento campamento digital	No hay diseños, manuales o productos. Solo contacto con entidad sede, se proyecta para semestre 2015-2	Concedida	Comunicador, logístico, ingeniero, personal de apoyo, personal de difusión.
Apprende	Coordinador de PRAU y Docente	proyecto de app	Incubadora de app, no hay desarrollos	Concedida	Ingeniero, programador, diseñador, comunicador contenidos.
Opengames	Coordinador de PRAU y Docente	Desarrollo de video juegos para móviles	Incubadora de juegos para móviles, no hay desarrollos	Estudio de fondo	Ingeniero, programador, diseñador, comunicador contenidos.
RutApp	Coordinador de PRAU y Docente	app	app rutas de transporte publico	Estudio de fondo	Ingeniero, programador, diseñador, comunicador contenidos.
Radiotek CTS	Coordinador de PRAU y Docente	programa de radio	al aire desde la asignatura de seminario de ciencia tecnología y sociedad	Pendiente para registro	Staff de realización y producción.
Binarius	Coordinador de PRAU y Docente	Community manager	Desarrollo desde la asignatura de seminario de ciencia tecnología y sociedad	Pendiente para registro	Staff comunicador y diseñador
Tv virtual	Coordinador de PRAU y Docente	Streaming	Infraestructura ok, no está al aire, contenidos desactualizados.	Pendiente para registro	Programador, realizadores, comunicador contenidos, ingeniero.
Holograma	Coordinador de PRAU y Docente	Hologramas	Desarrollo de proyección básica. Desarrollo desde la asignatura de seminario de ciencia tecnología y sociedad	Pendiente para registro	Ingeniero, programador, diseñador, comunicador contenidos.
Realidad virtual	Coordinador de PRAU y Docente	Gafas realidad aumentada y virtual	Desarrollo desde la asignatura de seminario de ciencia tecnología y sociedad	Pendiente para registro	Ingeniero, programador, diseñador, comunicador contenidos.
ETD	Coordinador de PRAU y Docente	Evento	No hay diseños, manuales o productos.	Pendiente para registro	Comunicador, logístico, ingeniero, personal de apoyo, personal de difusión.
Virtual Sound	Coordinador de PRAU y Docente	Evento musical	No hay diseños, manuales o productos.	Pendiente para registro	Comunicador, logístico, ingeniero, personal de apoyo, personal de difusión.
VIM	Coordinador de PRAU y Docente	Video en móviles	Desarrollo desde la asignatura de seminario de ciencia tecnología y sociedad	Pendiente para registro	Ingeniero, programador, diseñador, comunicador contenidos.
Pro Mapping	Coordinador de PRAU y Docente	Mapping	Desarrollo desde la asignatura de seminario de ciencia tecnología y sociedad	Pendiente para registro	Ingeniero, programador, diseñador, comunicador contenidos.
Digimov	Coordinador de PRAU y Docente	Animación	Desarrollo desde la asignatura de seminario de ciencia tecnología y sociedad	Pendiente para registro	Ingeniero, animador, programador, diseñador, comunicador contenidos.

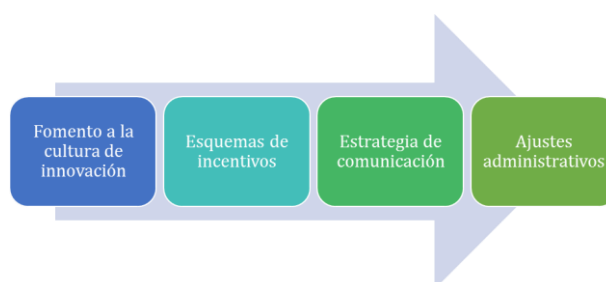


Figura 5. Frentes a intervenir del plan de acción del LST

Tabla 2. Estrategias propuestas para dinamizar el Laboratorio de Soluciones Tecnológicas

Estrategia 1:	Foros de innovación y emprendimiento
Objetivo	Generar cultura de innovación y emprendimiento
Descripción detallada: Actividad mensual para capacitar en temáticas relacionadas con el emprendimiento y la innovación buscando generar masa crítica, favoreciendo que estas sean abordadas de manera natural por la comunidad universitaria. Notas importantes: Destinar un día a las 6pm e invitar a un académico y un industrial para que hable de temas de innovación. Invitar a profesores y estudiantes. Que los profesores hagan difusión en sus cursos de esta actividad extracurricular. Que sea entrada libre y registrar los asistentes a partir de un listado de asistencia a la entrada. En cada mes se tocará un tema de actualidad asociado a innovación y emprendimiento. Se tendrá la mirada académica y la mirada industrial.	
Indicador de logro	Cantidad de asistentes a cada foro. Cantidad de invitados y empresas contactadas
Estrategia 2:	Formación de gestores de innovación: una mirada a los proyectos de aula
Objetivo	Formar a quienes serán replicadores del concepto de innovación en las aulas (docentes y monitores)
Descripción detallada: Capacitar a profesores, monitores, becarios en general, y que ellos paguen su servicio social a partir del acompañamiento y monitoreo de avance en cursos [6]. Diseñar el contenido del curso para capacitar a los estudiantes monitores (tener como base los cursos que hay en vicerrectoría de investigación, unidad de emprendimiento sobre innovación, semillero de innovación pero enfocado hacia gestión de innovación, y enseñar a otros a hacer innovación).	
Estrategia 3:	Charlas en el aula
Objetivo	Dar a conocer el LST entre los estudiantes de toda la facultad de ingeniería
Descripción detallada: Solicitar a través de los jefes de programa un espacio en los cursos donde se detecte que potencialmente se puede hacer uso del Laboratorio para construir productos. El espacio será de dos horas el inicio del semestre y se hará mercadeo del LST para mostrarlo a los estudiantes. Es posible que se programen mejor visitas al LST en lugar de hacer mercadeo en el aula.	
Indicador de logro	Número de visitas a los cursos de la Facultad de Ingeniería. Cursos impactados mediante charlas.
Estrategia 4:	Creación de un comité de innovación
Objetivo	Crear un comité de innovación que gestione los procesos de innovación de las Facultades de la UdeM [7]
Descripción detallada: Realizar la evaluación de los proyectos de aula de los programas académicos de las Facultades, incentivar la participación de otros docentes en el equipo de innovación, mejorar continuamente los procesos de innovación de las Facultades.	
Indicador de logro	Profesores seleccionados / Facultad
Resultados	Realizar un seguimiento a los proyectos de innovación y a los procesos de selección de proyectos.
Estrategia 5:	Inventario de proyectos de aula con potencial de comercialización
Objetivo	Estructurar un inventario de proyectos de aula de las diferentes ingenierías, donde se pueda obtener como producto final un prototipo que luego pueda ser madurado en el LST.
Descripción detallada: Construir un formulario que permita recopilar información sobre los proyectos de aula que desarrollan los docentes en sus cursos. A partir de ello se puede analizar cuáles cursos logran obtener prototipos que tras un proceso de maduración puedan derivar en productos y servicios comercializables. Estos procesos deben ser documentados con mayor detalle con el fin de determinar si pueden entrar al LST. Ya se tiene una primera aproximación a este inventario (se anexa a esta propuesta).	
Indicador de logro	Cantidad de proyectos de aula detectados en el sondeo
Estrategia 6:	Plan Padrinos
Objetivo	Impulsar el LST a partir de consultorías con instituciones reconocidas por su trayectoria en temas de innovación y emprendimiento.
Descripción detallada: Establecer contactos con instituciones que tengan reconocimiento y trayectoria reconocida en procesos de innovación, ensamble con proyectos de aula, emprendimiento. Este relacionamiento servirá para capturar las mejores prácticas por parte de ellos, y que se ofrezca un vínculo gana-gana a la institución. Ya se hizo un primer acercamiento con el Programa de Gestión tecnológica -PGT- de la UdeA, y la Doctora Ana Lucía Pérez (su directora) está dispuesta a apoyar el LST para su dinamización. Ella aportará toda su experiencia para implementar algunas buenas prácticas exitosas en el PGT. Como retribución se pueden ofrecer las siguientes opciones: hacer charlas compartidas UdeA y UdeM donde pueda participar personal de ambas instituciones; en el caso de productos que se deriven, se puede ofrecer propiedad intelectual compartida. Acompañar los procesos de innovación e investigación aplicada, orientando a los investigadores y estudiantes durante el proceso de validación de la tecnología planteada con empresas y/o corporaciones estratégicas. Durante este proceso, se identifican los puntos fuertes para continuar con el desarrollo o bien para identificar las debilidades que conlleven cambios en la estructuración del producto.	
Indicador de logro	Cantidad de estrategias estructuradas con el apoyo de la institución que actúa como "padrino". Si se trata de estrategias de capacitación: cantidad de personas capacitadas. Si se trata de productos de innovación: cantidad de patentes, registros.
Estrategia 7:	<i>Bootcamps</i> segmentados
Objetivo	Desarrollar capacidades sobre el desarrollo y validación de productos de innovación basados en trabajo conjunto de equipos interdisciplinarios
Descripción detallada: Seleccionar estratégicamente personal administrativo y académico (docentes y estudiantes) para que realicen actividades de creación de productos de innovación basados en metodologías ágiles. Con ello, se busca sensibilizar sobre la importancia de acelerar los procesos administrativos para la culminación exitosa de los desarrollos de alto impacto que se llevan a cabo en la institución.	
Indicador de logro	Personas sensibilizadas por Bootcamp
Resultados esperados	Procesos administrativos más ágiles que permitan acceder a recursos económicos con mayor celeridad y/o tiempos asignados por los investigadores de la UdeM para desarrollar proyectos de investigación aplicada.
Estrategia 8:	Actividades de integración – Grupo de Innovadores
Objetivo	Crear espacios de co-creación entre estudiantes y profesores de la Universidad de Medellín.
Descripción detallada: Proveer de un espacio de reunión (una o varias veces durante el semestre académico) para profesores y estudiantes de la institución, que permita realizar actividades de co-creación que deriven en productos altamente innovadores. Así mismo, se propone la realización de actividades lúdicas que incentiven la continua participación del equipo innovador. Los realizadores del presente informe, proponen actividades en campo abierto.	
Indicador de logro	Número de asistentes de las sesiones de co-creación Actividades realizadas por mes Número de estudiantes / Número de Profesores
Resultados	Generación de ideas de innovación que puedan derivar en productos de alto impacto para la sociedad.
Estrategia 9	Potenciando el ADN innovador
Objetivo	Generar cultura de innovación en estudiantes y docentes
Descripción detallada: Se trata de programar un conjunto de intervenciones en las aulas para motivar a los estudiantes y docentes al uso del LST. El paso a paso de indica a continuación:	

1. Escoger uno o dos cursos de semestres tempranos de cada ingeniería. Pensar en asignaturas como Introducción a la ingeniería que está disponible en cada programa. Esta selección debe ser hecha con los jefes de programa, ya que son ellos quienes conocen los docentes más apropiados y dispuestos para este tipo de cambios.
2. Plantear a los docentes de los cursos seleccionados la iniciativa, que incluye un plan de visitas (una o dos por asignatura al semestre). En cada intervención se harán juegos, dinámicas, actividades de co-creación, para mostrar el concepto de innovación de una forma divertida y fácil de entender.
3. Será el docente quien se encargue de indicar las sesiones apropiadas para introducir el concepto de innovación y será un grupo de personas capacitadas en el tema el que lidere las sensibilizaciones.
4. Durante la ejecución de estas actividades el docente del curso debe estar muy atento tomando nota, grabando, y preparándose porque él será quien ejecute las lúdicas en los semestres siguientes.
5. Se espera en cada semestre impactar cursos diferentes, y que cada docente se encargue, una vez entienda qué tipo de actividades se realizan, de ejecutarlas con sus estudiantes e incentivar la cultura de innovación. De esta forma se garantiza un proceso progresivo con indicadores en incremento en cuanto al número de cursos y estudiantes sensibilizados en innovación.

Estrategia 10: Cambios micro-curriculares para incluir la innovación

Objetivo Materializar el concepto de innovación mediante su incorporación en los micro currículos de las asignaturas

Descripción detallada: Una vez los estudiantes tengan conciencia del concepto de innovación, es necesario que lo materialicen construyendo productos y servicios innovadores como solución a problemas y necesidades del entorno. Para lograrlo se propone la siguiente dinámica:

1. Escoger uno o dos cursos de semestres avanzados (recomendable que sean a partir del sexto semestre) de cada ingeniería. Pensar en asignaturas donde sea posible obtener productos o servicios en versión de prototipo, y que puedan dar soluciones a necesidades puntuales de una comunidad.
2. Retomar con los docentes de los cursos seleccionados el plan de visitas del cual se habló en la estrategia 9. Además de esto mencionar la intervención del micro currículo para definir un conjunto de hitos y entregas de un proyecto semestral que corresponderá con el producto o servicio desarrollado por los estudiantes. Los contenidos del curso y la forma de dictarlos deberán cambiar, buscando que se genere dinámica de innovación.
3. Programar sesiones de sensibilización retomando el concepto de innovación y dando contexto a lo que luego será un proyecto aplicado.
4. Durante el semestre se debe hacer seguimiento a los productos que se están construyendo, orientando a los estudiantes hacia la consecución de un resultado final de calidad. Las características de las entregas deben ser claramente definidas. Cuando los estudiantes formalicen una entrega debe haber personal externo asociado al problema que se está tratando de resolver (alguien de empresa), esto para dar mayor nivel de formalidad y compromiso.
5. La temática para la construcción de productos y servicios puede ser definida con aliados internos o externos a la universidad. Los aliados serán quienes determinen sus necesidades y también es ideal que asistan a algunas sesiones del curso (inicial, intermedia, final), lo cual le da un carácter serio al tema, y genera mayor compromiso por parte de los estudiantes.
6. La entrega final del curso debe ser conectada con la "Feria de la innovación" (que hace parte del proceso de captación y evaluación de ideas, lo cual garantizará mayor cantidad de participantes, y un nivel de responsabilidad mayor de los estudiantes, ya que en esta feria se cuenta con empresarios, invitados externos, y se hace una evaluación de las propuestas. Es fundamental conectar las entregas con iniciativas de la institución, para generar sinergias que permitan continuar con el desarrollo de productos más maduros en el futuro.
7. Se recomienda encaminar los mejores resultados con retos que lance la institución en sus concursos de mayor envergadura. Por ejemplo, alinear productos que se construyan en los cursos con necesidades que ya tengan identificadas las personas del nivel directivo o los encargados de unidades como el Centro de la Innovación o la unidad de emprendimiento.
8. Se espera en cada semestre impactar cursos diferentes, y que cada docente se encargue, una vez entienda qué tipo de actividades se realizan, y los productos esperados, de orientar su curso de la forma pactada. Así se garantiza un proceso progresivo con indicadores en incremento en cuanto al número de cursos y estudiantes sensibilizados en innovación.
9. Al finalizar cada semestre es ideal evaluar mejores formas de ejecutar la estrategia, y entregar informes con indicadores como el número de productos construidos, el nivel de madurez de los productos y un mapeo de los equipos que desearían continuar el proceso de construcción ya no como parte de un curso sino a título personal, y apoyados por personal idóneo de la unidad de emprendimiento o el Centro de innovación. Los equipos de estudiantes que deseen seguir el desarrollo entran en el proceso de legalización de la propiedad intelectual y generación de acuerdos, buscando que haya claridad en estos temas.
10. La retroalimentación permitirá detectar puntos de mejora e incorporarlos en los semestres futuros.

Estrategia 11: Monitores de innovación

Objetivo Crear la figura de "monitores de innovación" como apoyo a las labores del LST

Descripción detallada: Contar con estudiantes para hacer seguimiento y acompañamiento a los proyectos del LST. Ellos estarán bajo las mismas reglas de un monitor académico, solo que no estarán a cargo de asesorías para proyectos, sino con labores propias del LST: Asesorar equipos, gestionar equipos, apoyar al director del LST, capacitarse en temas de innovación, replicar la formación obtenida en temas de innovación. Un estudiante se motiva más fácil con el discurso de un par suyo (un monitor), y no de un profesor.

Con el desarrollo e implementación de las 11 estrategias para la dinamización del Laboratorio de Soluciones Tecnológicas de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Medellín, se plantea que los procesos de aprendizaje de los estudiantes de pregrado de ingeniería se ajusten más a las necesidades de los objetivos de los cursos de pregrado. Asimismo, a través de la resolución de problemas reales y/o simulaciones de dichos problemas en un espacio equipado con tecnología de prototipado rápido como impresoras 3D y equipos de cómputo de última generación, se prevé llevar a dichos estudiantes a ser más competitivos de acuerdo a las necesidades de las empresas de hoy, posicionando así la educación superior al mismo nivel de los requerimientos de la industria.

4. CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este trabajo hacen parte de la ejecución de un de investigación financiado por Colciencias para dinamizar la educación a nivel superior, incluyendo modalidad virtual. El LST constituye parte fundamental en la formación de estudiantes, ya que allí se canalizan y materializan todos los aportes que logran los estudiantes, buscando que los proyectos cuyos productos cuentan con la calidad y alcance adecuados puedan escalar a nivel industrial.

Es indispensable generar cultura de innovación en la Facultad, tanto a nivel de estudiantes como de docentes. La formación en innovación es el eje articulador de toda la iniciativa de creación del Laboratorio de Soluciones Tecnológicas. De igual forma es importante reconocer que la infraestructura no da resultados si no se tiene una

estructura funcional apropiada. Es por ello que se debe tener hacer operativa una guía metodológica estratégica para comenzar todos los procesos de forma ordenada y sistemática.

De igual forma se presentan las siguientes recomendaciones con el fin de optimizar recursos clave generando una máxima productividad del espacio:

- Para cada proyecto con potencial se debe asignar un docente interesado en orientar el trabajo de los estudiantes. Debe hacerse expreso en su plan de trabajo que indique la dedicación horaria con el número de estudiantes a asesorar.
- Lograr asignación de recursos mediante la presentación a convocatoria internas del Centro de innovación de la institución.
- Para verificar resultados comenzar con 2 o 3 proyectos piloto (o incluso uno por cada ingeniería).
- Ofrecer incentivos a los estudiantes que se vinculen.
- Se debe pensar en una estructura auto-sostenible, y hacer una proyección indicando los años en los cuales se espera el retorno de la inversión inicial.

REFERENCIAS

- [1] S. Hasanefendic, M. Heitor, and H. Horta, "Training students for new jobs: The role of technical and vocational higher education and implications for science policy in Portugal," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 113, pp. 328-340, 2016.
- [2] L. González and M. González, "Gestión estratégica de la Comunidad Colombiana de Cómputo Avanzado 3CoA® mediante análisis DOFA y cocreación," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 25, pp. 464-476, 2017.
- [3] E. Romero and J. Díaz, "El uso del diagrama causa-efecto en el análisis de casos," *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (México)*, vol. 40, 2010.
- [4] C. J. Polaino and A. d. J. Romillo, "Vinculación con la Sociedad en la Universidad de Otavalo, Ecuador," *Formación universitaria*, vol. 10, pp. 21-30, 2017.
- [5] R. V. López, E. P. González, and A. T. Zamora, "La universidad y su relación con el entorno. Tendencia en su desarrollo," *Anuario Ciencia en la UNAH*, vol. 15, 2018.
- [6] G. C. Borges and J. M. L. Calva, "La cultura de la innovación educativa en perspectiva de los gestores universitarios," *Vivat Academia*, pp. 57-68, 2016.
- [7] S. T. Morales, G. Gómez, and A. Suleny, "Análisis de una innovación social: el Comité Universidad Empresa Estado del Departamento de Antioquia (Colombia) y su funcionamiento como mecanismo de interacción," *Innovar*, vol. 25, pp. 141-152, 2015.

Tendencias investigativas en servicios en redes de telecomunicaciones

Carlos A. Gómez R.¹

José L. Arciniegas H.²

¹ Universitaria Agustiniiana Uniagustiniana

² Universidad del Cauca
Colombia

Esta revisión literaria integrativa o estado del arte ha sido organizada de manera conceptual para efectos de abordar los temas más relevantes en el área de servicios en redes de telecomunicaciones, la cual incluye tecnologías emergentes de las ciencias de la computación y las comunicaciones. El crecimiento de las redes y el tráfico de información se han dado de manera exponencial durante los últimos años, estableciendo con ello enormes retos para la academia y la industria. Así mismo, se hace evidente la evolución de los servicios soportados en las redes de telecomunicaciones. Dicha evolución marca una serie de desafíos que, según la revisión aquí expuesta, parte de la base de la infraestructura que soporta servicios tales como las tecnologías LTE y 5G y la manera en que estas pueden ser gestionadas más eficientemente. Con este objetivo se abordan temas de *nfv/sdn*, relacionados ampliamente con aspectos como la computación en la nube y la virtualización. Así mismo, resulta de gran interés analizar los fenómenos de *big data* y *learning analytics*. La revisión bibliográfica fue profundizada por un análisis bibliométrico que permite identificar las relaciones existentes entre cada temática, y así descubrir tendencias en el desarrollo de la investigación de las telecomunicaciones. Los resultados de esta revisión señalan que las principales tendencias en servicios corresponden a video, *streaming* y VoD, siendo estos los servicios que actualmente presentan el mayor nivel de exigencia las redes, considerando la masificación de servicios en dispositivo “inteligentes” (IoT) y la tendencia de contar con todos los servicios al alcance de un teléfono móvil (apps), todo lo anterior muestra una fuerte tendencia al acercamiento de las telecomunicaciones al desarrollo de servicios cercanos a la Industria 4.0.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo es una revisión amplia de los servicios en redes de telecomunicaciones. Para ello, se usó como instrumento el motor de búsqueda de la base de datos Scopus, con el fin de determinar la inspección. La definición de los tópicos es resultado de la inspección inicial de las publicaciones más recientes, así como del sondeo de los temas que actualmente hacen parte de los eventos internacionales más importantes en el área.

Para el presente estudio se han explorado particularmente ocho temáticas principales: NVF y SDN, LTE y 5G, video *streaming* y VoD, *cloud computing* y virtualización, *big data* y *learning analytics*, IoT, apps y seguridad, sobre las cuales se realizaron ecuaciones de búsqueda específicas. Este documento no es una revisión sistemática en todo su rigor, considerando la amplitud de los temas abordados. La revisión bibliográfica fue insumo para aplicar técnicas de mapeo VOS con el fin de realizar mediciones bibliométricas y descubrir tendencias en las investigaciones ligadas a la nueva era industrial 4.0. Se han logrado determinar algunos temas puntuales que forman importantes vértices en los mapas bibliométricos y se constituyen en temáticas investigativas de alto impacto, y que logran unir intereses ligados al desarrollo de la actual era industrial.

El análisis bibliométrico basado en un mapa de coocurrencia de palabras claves, permite encontrar conexiones de temáticas propias de las telecomunicaciones, con otras áreas de la ingeniería como las del desarrollo de software, o la automatización de control electrónico con fines industriales. Así, se pretende que los resultados del presente trabajo puedan orientar a equipos investigativos sobre las tendencias actuales de investigación mundial, ligadas a las telecomunicaciones, y así poder hacer aportes en las áreas de mayor desarrollo.

2. MÉTODO

En la metodología se consideran las fuentes de los documentos estudiados, así como la manera de llegar a ellos mediante las ecuaciones de búsqueda en el índice bibliográfico de citas (IBC) de Scopus, el cual funciona con base en el índice de citación (IC). Scopus ha sido elegido para la construcción del estado del arte presentado en este capítulo, debido a que es un IBC enfocado en la rama de ingeniería que permite acceder a publicaciones procedentes de más de 5.000 editoriales internacionales revisadas por especialistas. Las publicaciones, revistas y bases de datos que fueron tenidas en cuenta en este trabajo son las expuestas a continuación:

- *Elsevier*: editorial multimedia internacional líder en la provisión de información en ciencia, salud y tecnología. Sus productos incluyen revistas, colección de revistas electrónicas y el índice bibliográfico de citas Scopus, entre otros. Entre sus sellos editoriales se encuentran Academic Press, que hace parte de Elsevier and Technology, una editorial líder en la producción de libros científicos que es popular dentro de la comunidad científica internacional por la calidad de sus publicaciones y su extensa lista de autores reconocidos, entre los que se incluyen autoridades del mundo científico, ganadores de premios Nobel e investigadores y científicos de renombre.

¹ carlos.gomez@uniagustiniana.edu.co

² jlarci@unicauca.edu.co

- *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*: organización técnico-profesional mundial dedicada al avance de la tecnología para el beneficio de la humanidad y a la estandarización, entre otras cosas. Es la mayor asociación internacional sin ánimo de lucro, formada por profesionales de las nuevas tecnologías. La IEEE cuenta con conferencias, revistas y herramientas, tales como IEEE Communications Surveys and Tutorials, IEEE Network, IEEE Communications Magazine, entre otros muchos productos.
- *Association for Computing Machinery (ACM)* o Asociación de Maquinaria Computacional: publica revistas y periódicos científicos y además patrocina conferencias y eventos relacionados con las ciencias de la computación, como el International Collegiate Programming Contest (ICPC). Cuenta también con una extensa biblioteca digital –una de las más importantes de Estados Unidos– sobre investigación en ciencia computacional.
- *Springer*: portafolio científico, técnico y médico a nivel mundial, que brinda contenidos de calidad a través de información, productos y servicios innovadores a investigadores en instituciones académicas, instituciones científicas y departamentos corporativos de I+D. Springer tiene una de las colecciones de libros electrónicos más sólida de STM y HSS, así como una amplia gama de publicaciones híbridas y de acceso abierto. Springer hace parte de Springer Nature, una casa editorial global que apoya a la comunidad investigadora.
- *John Wiley*: editorial conocida por la publicación de material científico e información técnica. Son desarrolladores de soluciones de educación digital, aprendizaje, evaluación y certificación. A través de asociaciones con sociedades científicas, apoyan a los usuarios a comunicar descubrimientos que marcan la diferencia. Sus revistas científicas, técnicas, médicas y académicas en línea, libros y otros contenidos digitales se basan en un patrimonio de publicación de calidad de más de 200 años. Una de sus revistas es la International Journal of Digital and Analog Communication Systems, un referente en el área de los sistemas de comunicación.
- *Editorial Universidad del Cauca*: sello Editorial adscrito a la Vicerrectoría de Investigaciones de esta misma institución, cuyo propósito es editar, publicar y distribuir obras con los mejores estándares de contenido y presentación, sobre las diferentes áreas de conocimiento, así como crear colecciones y series coherentes con los propósitos misionales de dicha institución. Lo anterior responde al propósito de la Universidad del Cauca de difundir, en beneficio de la sociedad y de la Institución, sus productos de investigación y la creación artística y cultural tanto de sus miembros como de autores externos.
- *Eventos internacionales* (conferencias, simposios, etc.).
 - IST: evento organizado por el Instituto de Investigación (ICT) diseñado para proveer una oportunidad para que académicos y especialistas de la comunidad internacional de telecomunicaciones puedan conocer otros pares en Irán e intercambiar los últimos desarrollos en tecnologías emergentes, estándares en progreso, servicios y aplicaciones de los sistemas de información y comunicación, entre otros temas de interés en el área.
 - ACOSIS: foro para científicos, ingenieros y profesionales donde se presentan los últimos resultados en investigación, ideas, desarrollos y aplicaciones en las áreas de sistemas de comunicaciones y seguridad de la información.

El proceso llevado a cabo para la construcción de este documento tuvo en cuenta ecuaciones de búsqueda, criterios, horizonte temporal, número de registros, criterios de inclusión y de exclusión. En el momento de generar la ecuación se tuvieron en cuenta los siguientes pasos para cada uno de los temas claves:

1. Temas principales que son tendencia relacionados con el operador AND.
2. Años cubiertos: desde 2015 hasta 2018.
3. Campos de estudio: ciencias de la computación, ingeniería.
4. Los primeros documentos en ser buscados fueron surveys o reviews. A partir del año de publicación, los artículos tenidos en cuenta son de los años siguientes a la fecha de publicación de la encuesta. Para ello se excluye en la ecuación el año de las reviews.
5. El orden del listado corresponde al mayor número de citas (encontrado en “Sort on: Cited by (highest)”).
6. En algunos casos se tuvo en cuenta el criterio de autores más relevantes en la ecuación de búsqueda.

Las palabras clave corresponden a los temas principales mencionados en la propuesta inicial, los cuales son:

- a. *NFV & SDN*: virtualización de funciones de red (Network Function Virtualization- nfv) y redes definidas por software (Software Defined Network-sdn). nfv es un marco de referencia relacionado con la arquitectura de redes, en el cual la virtualización de servicios es realizada por hardware dedicado, donde los servicios se pueden hospedar en máquinas virtuales (virtual machine-VM) teniendo en cuenta tres criterios: decoupling (desacople

entre software y hardware, es decir, el software de redes y aplicaciones es separado de los dispositivos, permitiendo que los servicios de redes sean implementados como software); flexibilidad (automatización y escalamiento); y operaciones dinámicas (control de parámetros de operación de funciones de red). Esta es una tecnología propuesta por el European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Por su parte, SDN es un conjunto de técnicas relacionadas con el área de redes enfocadas a simplificar su provisión y gestión. Se divide el concepto de red en dos partes: plano de control y plano de datos. La aplicación de SDN a NFV contribuye a la gestión dinámica de recursos y la orquestación de servicios inteligentes [1].

2. *LTE & 5G*: se espera que las redes de telecomunicaciones 5G (o de próxima generación) lleguen al mercado en 2020. Además de brindar mejoras en la velocidad, se espera que esta tecnología desate todo un ecosistema del internet de las cosas masivo, en el que las redes puedan satisfacer las necesidades de comunicación de millones de dispositivos conectados, con un equilibrio entre velocidad, latencia y costo. La red inalámbrica de la próxima generación abordará la evolución más allá del internet móvil y alcanzará al internet de las cosas masivo hacia 2020. La evolución más notable en comparación con las actuales redes 4G y 4.5G (LTE avanzado) es que además de un aumento en la velocidad de los datos, los nuevos casos de uso del internet de las cosas y de la comunicación requerirán nuevos tipos de desempeño mejorado; como la “latencia baja”, la cual brinda una interacción en tiempo real a los servicios que utilizan la nube. A diferencia de los servicios actuales del internet de las cosas, que sacrifican rendimiento para sacar el máximo provecho a las tecnologías inalámbricas existentes (3G, 4G, Wifi, *bluetooth*, zigbee, etc.), las redes 5G estarán diseñadas para alcanzar el nivel de rendimiento que necesita el internet de las cosas masivo. Esto hará posible que se perciba un mundo completamente ubicuo y conectado [2].
3. *Video streaming & VoD*: el video streaming es una tecnología para la optimización de descargas y la reproducción de archivos de audio y video de alto peso. El servicio de streaming de video permite ofrecer calidad de difusión para llegar a una mayor audiencia en dispositivos móviles, los más populares actualmente. El streaming de contenido es un servicio para audiencias locales e internacionales. VoD o video bajo demanda (video on demand), es un servicio interactivo de televisión que permite el acceso a contenidos multimedia (series, películas, videos, y más, en resolución estándar o HD) de forma instantánea, personalizada y en cualquier momento [3].
4. *Cloud computing & virtualización*: *cloud computing*, o simplemente *cloud*, consiste en la distribución de recursos informáticos on-demand –desde aplicaciones hasta centros de datos– a través de Internet, con un pago variable en función del uso. Dentro de los servicios brindados por *cloud computing* se encuentran software como servicio (SaaS), plataforma como servicio (PaaS) y la infraestructura como servicio (IaaS). La virtualización permite compartir infraestructura de red y la “softwarización” de las funciones de red [4].
5. *Big data & learning analytics*: el *big data* ha sido descrito como un término relativo que está destinado a representar el desenfadado e inconcebible crecimiento del desempeño computacional y el almacenamiento de datos. Big data se puede categorizar de diferentes maneras: orientado al desarrollo con un enfoque cuantitativo en el tamaño de los datos; orientado al proceso con un enfoque en los procesos involucrados en la recopilación, la conservación y el uso de datos; o con una orientación cognitiva y un enfoque en la forma en que los seres humanos, con sus capacidades cognitivas particulares, pueden relacionarse con los datos. *Learning analytics* se basa en los datos procedentes de las interacciones de usuario con información y tecnologías de comunicación (TIC). Las técnicas de minería de datos se aplican comúnmente para identificar patrones en datos de rastreo (eventos con marca de tiempo sobre vistas de recursos específicos, intentos, mensajes de discusión vistos o publicados). La interpretación de estos patrones puede ser usada para predecir comportamientos y/o mejorar procesos, lo cual ha sido llamado *learning analytics* [5].
6. *Internet of Things (IoT)*: es un término general para una amplia gama de tecnologías, aplicaciones y casos de uso, que están habilitados por la conexión de objetos y dispositivos con una dirección IP. Entre los términos que son tendencia resultado en IoT se encuentran: ciudades inteligentes, redes inteligentes, hogares inteligentes, seguridad física, ciberseguridad, gestión de activos y logística. El IoT también puede ser definido como la próxima etapa del internet, en la cual las cosas y los objetos con sensores y actuadores se conectan a internet con el fin de recopilar, enviar y obtener datos; cosas que se pueden monitorear y controlar fácilmente, ser identificadas automáticamente por otras cosas, e incluso tomar decisiones por ellas mismos [6].
7. *Apps*: los Smartphone se han convertido en dispositivos omnipresentes debido a una amplia gama de opciones de conectividad como LTE, GSM, CDMA, Wifi, GPS, bluetooth y NFC. La popularidad de Android ha alentado a los desarrolladores a proporcionar aplicaciones innovadoras. Google Play, el mercado oficial de aplicaciones de Android, alberga las aplicaciones de un desarrollador por una tarifa nominal. A diferencia de la tienda de aplicaciones de Apple, Google Play no verifica aplicaciones cargadas manualmente. En cambio, el mercado oficial depende de Bouncer un entorno emulado dinámico para controlar y proteger el mercado de las amenazas de aplicaciones maliciosas [7]. Aunque Bouncer protege contra las amenazas de malware, lo hace no analizar las vulnerabilidades entre las aplicaciones cargadas [8].

8. *Seguridad*: la investigación en seguridad se centra en el desarrollo de técnicas para defender sistemas y redes informáticos contra el uso indebido y la interferencia. Algunas direcciones de investigación en esta área son seguridad de red (la infraestructura de internet actual es un objetivo común de ataque y el vehículo para numerosas actividades no deseadas en aplicaciones de red), seguridad de informática en la nube (una tendencia innegable es el aumento de uso de “nubes”, instalaciones donde los clientes tercerizan y procesan datos, donde la privacidad y la integridad de las actividades del cliente son primordiales), seguridad de los dispositivos móviles (que presentan desafíos y oportunidades interesantes en el área de la seguridad informática) [9].

A continuación, las ecuaciones de búsqueda para cada tema principal.

- *SDN, NFV. TITLE-ABS-KEY (sdn AND nfv) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) . Sort on: Cited by (highest).*

Áreas como matemáticas, ciencias sociales y ciencias de decisión no hacen parte del alcance de este estado del arte. Por ejemplo, en el caso específico de SDN y NFV, los trabajos considerados fueron publicados en 2015, por ello, las ecuaciones de búsqueda de artículos excluyen este año, así como el tipo de documento “review”.

TITLE-ABS-KEY (SDN AND NFV) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (EXCLUDE (PUBYEAR , 2015)) AND (EXCLUDE (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) . Sort on: Cited by (highest).

- *5G, LTE. TITLE-ABS-KEY (LTE AND 5G) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) . Sort on: Cited by (highest).*

Después de aplicar la ecuación anterior, la búsqueda posterior fue la siguiente.

TITLE-ABS-KEY (lte AND 5g) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP ") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , " ENGI ")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (EXCLUDE (PUBYEAR , 2016) OR EXCLUDE (PUBYEAR , 2015)) AND (EXCLUDE (DOCTYPE , "re"))

- *VoD, Streaming. (TITLE-ABS-KEY (VoD AND streaming)) AND (qoe) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) . Sort on: Cited by (highest).*

La siguiente ecuación es el resultado de incluir, además de VoD y Streaming, los temas de QoE, TV y Social media.

TITLE-ABS-KEY (VoD AND streaming AND qoe AND social AND media) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))

- *Cloud Computing. TITLE-ABS-KEY (cloud AND computing AND virtualization) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) . Sort on: Cited by (highest).*

La ecuación anterior tiene en cuenta documentos del tipo: Review o Survey (“(LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))”), lo cual fue considerado para ofrecer una mayor cobertura de la temática. La siguiente ecuación resulta de la búsqueda sobre cloud computing, virtualización y fog computing, eligiendo únicamente documentos del tipo *review*, en los campos de ciencias de la computación e ingeniería.

(TITLE-ABS-KEY (cloud AND computing AND virtualization)) AND (fog AND computing) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "RE")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI"))

Algunas fuentes no se encontraron directamente mediante una ecuación de búsqueda, sino mediante búsquedas más especializadas, como el caso de uno de los artículos sobre fog computing que fue hallado dentro de los resultados de uno de los autores con mayor número de publicaciones recientes sobre el tema y con mayor número de citas, que corresponde a una revisión sobre el tráfico en redes móviles publicado dentro del mismo lapso de tiempo de este trabajo.

- *Big data and learning analytics.* *big AND data AND learning AND analytics AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI")). Sort on: Cited by (highest).*
- *IoT Internet of Things.* *iot AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENER")). Sort on: Cited by (highest).*
- *Applications.* *app AND ios AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI"))*

Uno de los autores más importantes sobre aplicaciones es Kim Kwang Raymond Choo de la Universidad de Texas en San Antonio, Estados Unidos, quien ha sido citado en 1.580 documentos y fue escogido para la siguiente búsqueda.

app AND ios AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI")) AND (LIMIT-TO (PREFNAMEAUID, "choo, K.K.R.#8716262400"))

Con el fin de considerar aplicaciones de Microsoft, se definió el siguiente criterio:

app AND windows AND mobile AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "cr")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI"))

- *Security.* Seguridad es un tema que ha sido relacionado con otras temáticas como seguridad en la implementación, VoIP, SDN, cloud, IoT y biométricas.

security AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "cr"))

2.1 Selección

El crecimiento de las nuevas tecnologías, junto con los retos que ellas enfrentan, hacen parte de los principales hallazgos de esta revisión. Las fuentes describen las características, la infraestructura, la arquitectura, el comportamiento y la operación de cada uno de los sistemas que estudian. El cambio de paradigmas es un hecho, sus beneficios y ventajas son expuestos a lo largo del estudio de los artículos, *papers* y *reviews*. La Tabla 1 presentan la relación de los artículos más destacados en cada una de las temáticas seleccionadas, como se describió en la sección metodológica, mediante la generación de la ecuación de búsqueda para la discriminación preliminar de resultados dentro de los motores de Elsevier y Scopus

Tabla 1. Artículos más influyentes por temática

Tema	Autor	Título	Tipo
NFV SDN	[1]	A Survey on Software-Defined Networking	Review
	[10]	Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges	Article
	[11]	When big data meets software-defined networking: SDN for big data and big data for SDN	Article
	[12]	Security in Software-Defined Networking: Threats and Countermeasures	Article
	[13]	Software-defined networking: A comprehensive survey	Article
	[14]	Software-Defined Network Function Virtualization: A Survey	Survey
LTE 5G	[15]	SDN and Virtualization-Based LTE Mobile Network Archit.: A Comprehensive Survey	Article
	[2]	Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey	Review
	[16]	Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks	Article
	[17]	Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Sys.: Potentials and Chall.	Review
	[18]	LTE-a pro (4.5G) as pre-phase for 5G deployment: Closing the gap between technical requirements and network performance	Conference Paper
	[19]	Large-scale mobile traffic analysis: A survey	Review
Video, Streaming, VoD	[20]	Recent advancements in M2M communications in 4G networks and evolution towards 5G	Conference Paper
	[3]	Measurement of quality of experience of video-on-demand services: A survey	Review
	[21]	A free-riding resiliency incentive mech. for VoD strea. over hybrid CDN-P2P networks	Conference Paper
	[22]	Routing protocol development for quality of service optimization of video-on-demand system over mobile ad hoc networks	Article
	[23]	Una solución de VoD con IPTV en ambientes OTT para comunidades académicas virtuales	Book
	[24]	A concise review of the quality of experience assessment for video streaming	Review

	[25]	Multiple description-DASH: Pragmatic video stre. Maxi. end-users' quality of experience	Conference Proceeding
	[26]	A Survey on Quality of Experience of HTTP Adaptive Streaming	Review
	[4]	State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of Internet of things and cloud computing	Review
Cloud Computing & Virtualización	[27]	A Privacy-Preserving and Copy-Deterrence Content-Based Image Retrieval Scheme in Cloud Computing	Article
	[28]	Dynamic remote data auditing for securing big data storage in cloud computing	Article
	[29]	A Secure and Dynamic Multi-Keyword Ranked Search Scheme over Encrypted Cloud Data	Article
	[30]	An overview of network virtualization and cloud network as a service	Review
	[31]	A Comprehensive Survey on Fog Computing: State-of-the-Art and Research Challenges	Review
	[32]	Survey on fog computing: architecture, key technologies, applications and open issues	Review
Big Data & Learning Analytics	[5]	Big data, bigger dilemmas: A critical review	Review
	[33]	Social big data: Recent achievements and new challenges	Article
	[34]	Strategies and Principles of Distributed machine Learning on Big Data	Review
	[35]	Learning analytics should not promote one size fits all: The effects of instructional conditions in predicting academic	Article
	[36]	Big Data computing and clouds: Trends and future directions	Article
IoT	[6]	Data mining for the internet of things: Literature review and challenges	Review
	[37]	Integration of Cloud computing and Internet of Things A survey	Review
	[38]	Enabling IoT interoperability through opportunistic smartphone-based mobile gateways	Article
	[39]	Secure integration of IoT and Cloud Computing	Article
	[40]	IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings-Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems	Article
	[41]	The internet of things: a survey	Survey
	[42]	Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models	Article
Apps	[43]	Android security: A survey of issues, malware penetration, and defenses	Review
	[44]	ANDRUBIS - 1,000,000 Apps Later: A View on Current Android Malware Behaviors	Conference Paper
	[45]	Android mobile VoIP apps: a survey and examination of their security and privacy	Review
	[46]	AndroZoo: Collecting millions of Android apps for the research community	Conference Paper
	[47]	What do mobile app users complain about?	Article
	[48]	Circumventing iOS security mechanisms for APT forensic investigations: A security taxonomy for cloud apps	Review
	[49]	Understanding the test automation culture of app developers	Conference Paper
Seguridad	[9]	A survey of security in software defined networks	Review
	[50]	Cloud security and compliance - A semantic approach in end to end security	Article
	[51]	Security, privacy and trust in Internet of things: The road ahead	Article
	[52]	The internet of things for health care: A comprehensive survey	Article
	[53]	Security in cloud computing: Opportunities and challenges	Article
	[54]	Fingerprint liveness detection based on multi-scale LPQ and PCA	Article
	[55]	Anonymous Authentication for Wireless Body Area Networks With Provable Security	Article in Press

De la revisión bibliográfica basada en los artículos de la tabla 1, se identifica que una de las tendencias claramente marcadas en las nuevas tecnologías es la convergencia de las mismas. Así mismo, las nuevas tecnologías se encuentran involucradas con otras tecnologías, como en el caso de NFV con SDN y *cloud computing*, SDN con big data y de IoT con redes móviles. Una tendencia tangible es el desarrollo de aplicaciones que permiten la articulación de tecnologías complementarias. Las redes tradicionales son complejas y difíciles de administrar, lo cual llevó a la creación de redes definidas por software (SDN), en las cuales la separación de planos de control y datos ofrece versatilidad, además de reducir la complejidad de la red.

La primera piedra en 5G es el *release 14*, donde se presentan los estándares para 5G y se presentan otras soluciones para nuevos casos de uso. En el servicio de video *streaming* y VoD la calidad de la experiencia (QoE) es una métrica fundamental. Otras métricas importantes son la calidad del video, la participación del usuario, los eventos de cambio de velocidad de bits para todas las sesiones de video, el tiempo de inicio de la reproducción y el número de interrupciones, entre otras. Además, existen otros modelos que pueden contribuir a medir la QoE a una escala mayor.

Entre los hallazgos de *cloud computing* se encuentran los servicios y los modelos de implementación. Los esfuerzos para proveer servicios en la nube de alta calidad de aprovisionamiento, paradigmas como la virtualización de la red, SDN y Naas soportan la entrega de servicios confiables en la nube. Big data es un paradigma mediante el cual se relaciona de forma cruzada información privada sobre las preferencias del consumidor y los productos, con información de tweets, blogs, evaluaciones de productos e información de las redes sociales, lo cual representa oportunidades para que organizaciones comprendan las necesidades de sus clientes, sean capaces de predecir sus deseos y demandas y optimicen el uso de los recursos. Así mismo, el *big data* se caracteriza por ser un modelo multi-V (variedad, velocidad, volumen, valor y veracidad), donde la variedad representa los tipos de datos, la velocidad la rapidez a la que se producen y procesan los datos y el volumen define la cantidad de datos. Además de estos tres pilares, el big data incorpora la veracidad y el Valor de la información, que corresponden a la confianza y el valor obtenido mediante su explotación, respectivamente.

Por otro lado, en los últimos años se ha presentado una convergencia productiva para múltiples tecnologías y sistemas hacia una infraestructura basada en IP. Dicha convergencia tecnológica se encuentra en aceleración gracias a la

creciente implementación de dispositivos de punto final basados en IP bajo lo que llamamos IoT. Uno de los hallazgos en el área de aplicaciones móviles es la construcción de *crawlers*, uno de ellos llamado Andrubis, el cual es un sistema de análisis de larga escala automatizado capaz de analizar miles de muestras al día para arrojar un análisis de malware en las apps de Android. En los trabajos dedicados a la temática de seguridad, sobresale el desarrollo de herramientas para reducir el sobre coste computacional durante operaciones que incluyen firmas algebraicas. Un aspecto clave es la importancia de establecer expectativas y confianza con los usuarios.

3. RESULTADOS

La aplicación de la metodología y la selección de la bibliografía más significativa permite realizar un análisis bibliométrico de coocurrencia de las palabras claves usadas para la representación de cada uno de los artículos resultantes. El estudio arrojó un mapa bibliométrico de coocurrencia construido con el software VOSviewer, el cual utiliza la técnica de mapeo VOS [56], donde VOS representa la visualización de similitudes basadas en la distancia.

Aunque el software VOSviewer clasifica automáticamente los ítems para crear clústeres, muchos términos similares son agrupados de forma diferente. Por ejemplo, el término “5G” es considerado diferente a “5G communications”, aun cuando un evaluador experto sabe que son sinónimos; esto hace necesario refinar los datos antes de usarlos en VOSviewer. Por ello, se realizó un proceso de refinamiento de datos que consistió en buscar términos similares, los cuales fueron revisados por un evaluador humano y reemplazados con términos comunes.

Para la construcción del mapa se usó como insumo la información de los artículos de investigación, según la metodología de búsqueda y filtrado en el índice Scopus, usando la información de un máximo de 2.000 artículos por cada una de las palabras claves enunciadas. Con lo anterior, la técnica de graficación de VOS crea una matriz de similitud basada en una matriz de coocurrencia de las palabras claves. Adicionalmente, se parametriza el software VOSviewer con el fin de analizar las palabras claves que presentan 10 ocurrencias en la base completa de artículos, como mínimo.

El resultado de la matriz de similitud se representa de forma gráfica, donde cada palabra clave es clasificada como un ítem representado por su etiqueta y (por defecto) por un círculo. El tamaño de la etiqueta y el círculo de un ítem son determinados por su peso; cuanto mayor sea el peso de un ítem, mayor será la etiqueta y el círculo del artículo. Es posible que la etiqueta no se muestre para algunos ítems, lo cual se hace para evitar la superposición de etiquetas. De la misma manera, el color de una posición viene determinado por el clúster al que pertenece, donde las líneas entre elementos representan enlaces. De forma predeterminada, se muestran un máximo de 500 líneas que representan los 500 vínculos más fuertes entre los elementos [57]. La Figura 1 representa el mapa de coocurrencia de palabras clave.

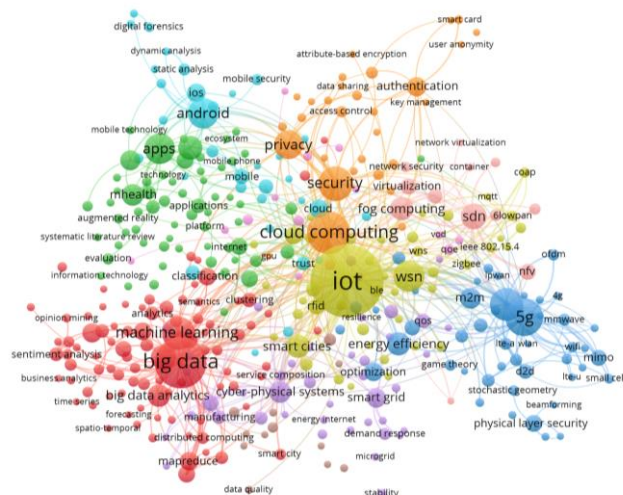


Figura 1. Mapa de coocurrencia de palabras clave de investigaciones asociadas a aplicaciones de las telecomunicaciones

El mapa de la Figura 1 representa una interesante clasificación de las diversas temáticas de investigaciones actuales en torno a los servicios de las redes de telecomunicaciones y la interrelación entre dichas temáticas. El análisis de coocurrencia deja ver la existencia de temas comunes agrupados en clústeres identificados por colores diferentes. Puede observarse una importante clasificación de investigaciones alrededor de temas de comunicaciones móviles y su última generación “5G” en el clúster azul. También es evidente la investigación alrededor del análisis de datos (big data) en el clúster rojo. Un poco menos de atención reciben temas de seguridad en redes y aplicaciones móviles (clúster naranja); sin embargo, el aspecto más relevante del mapa de coocurrencia es que de forma natural y preponderante sitúa al internet de las cosas (clúster amarillo) como la temática principal de las investigaciones actuales en el área de servicios de redes de telecomunicaciones. La Figura 2 muestra las relaciones más fuertes que el mapa VOS logra identificar alrededor de IoT.

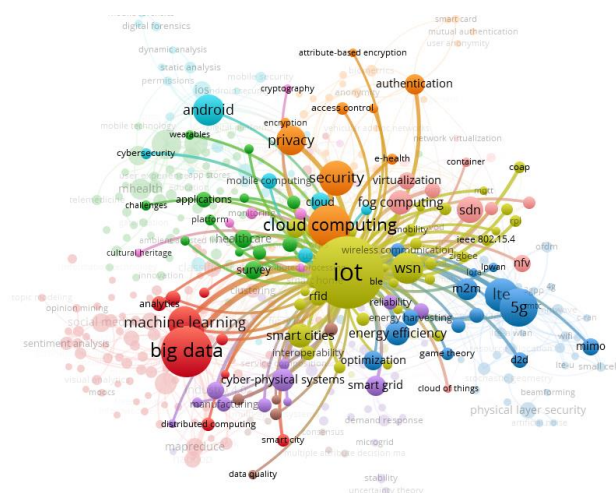


Figura 2. Relaciones más fuertes del mapa VOS alrededor de IoT

El mapa de la Figura 2 obedece al gran número de investigaciones en torno a temas como: redes de automatización industrial, redes móviles para comunicación de redes de sensores, análisis de datos de sensores en diversas aplicaciones industriales, aplicaciones de IoT para sectores industriales específicos, redes entre dispositivos terminales (maquina a máquina, M2M) y redes y aplicaciones para ciudades inteligentes. Para entender un poco más porqué el tema de IoT parece ser transversal a la gran mayoría de artículos de investigación de servicios de telecomunicaciones se ha estudiado el resumen de algunos de los artículos de investigación más citados.

Tao [58] investiga el lugar de las aplicaciones de las tecnologías de IoT y la computación en la nube en la manufactura. A continuación, se propone un sistema de servicios y arquitectura de fabricación basado en la nube y en IoT, el cual establece el tipo de tecnología necesaria para la realización de la manufactura basada en la nube. Por su lado, Al-Fuqaha [59] señala que el IoT es posible gracias a los últimos avances en identificación por radiofrecuencia (RFID, en inglés), sensores inteligentes, tecnologías de comunicación y protocolos de Internet. La premisa básica es que los sensores inteligentes colaboren directamente, sin intervención humana, para ofrecer una nueva clase de aplicaciones. La revolución actual en las tecnologías de internet, móviles y máquina a máquina (M2M) puede considerarse la primera fase del IoT. En los próximos años, se espera que la IO sirva de puente entre diversas tecnologías para posibilitar nuevas aplicaciones mediante la conexión de objetos físicos en apoyo de una toma de decisiones inteligente. Al-Fuqaha [59] también señala la cercanía del IoT con otras tecnologías emergentes, entre las que se incluyen los grandes análisis de datos, el *cloud computing* y el *fog computing*.

Respecto a las comunicaciones móviles, Palatella [60] muestra que en los últimos años ha surgido gradualmente una gran variedad de tecnologías de la comunicación que reflejan una gran diversidad de ámbitos de aplicación y de requisitos de comunicación. Esta heterogeneidad y fragmentación del panorama de la conectividad está obstaculizando actualmente la plena realización de la visión del IoT al plantear varios retos complejos de integración. En este contexto, el advenimiento de los sistemas celulares de 5G –con la disponibilidad de una tecnología de conectividad, que es a la vez verdaderamente ubicua, fiable, escalable y rentable– se considera un motor potencialmente clave para el IoT global aún no emergente. Así, IoT tiene un gran protagonismo en el desarrollo tecnológico de una nueva era de conexiones industriales entre dispositivos, movilidad, ubicuidad y comunicaciones unificadas en la nube.

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

De la revisión del estado del arte de este trabajo se han extraído las siguientes conclusiones y perspectivas futuras:

- El internet de las cosas (IoT) se sitúa como la temática de los servicios de las redes de telecomunicaciones que logra conectar el desarrollo de las redes de datos con las aplicaciones de todo tipo. Mediante IoT el desarrollo de las telecomunicaciones se acerca más que antes a temáticas como la automatización industrial, la conectividad de las máquinas, la recolección y el análisis masivo de datos; todos temas centrales de la nueva era de la industria 4.0.
- Los desarrollos recientes en el dominio de las TIC, como la computación en la nube o el big data, representan exigencias mayores en ancho de banda de los usuarios, así como una gestión más dinámica de los proveedores de servicios, por ello, una solución es SDN, cuyas ventajas se reflejan en el rendimiento y el fomento de la innovación.
- El entendimiento de las bases y los fundamentos de cada tecnología son lo que permite el avance y la evolución de las mismas. Una línea de investigación futura radica en el estudio de consumo de energía –aspecto clave en todas las tecnologías– junto con las medidas de seguridad y protección de los sistemas, en cuanto se refiere a almacenamiento de información en la nube y protección de dispositivos.

- Entre las líneas futuras de investigación de SDN y NFV se encuentran los servicios de enrutamiento IP virtualizados, las herramientas de prueba de SDN, metodologías y procedimientos, el *stack* de SDN moderna, OpenRadio y software definido por celular, trabajo en redes inalámbricas, OpenFlow Optimized Switchk, ASIC Design, SDN para redes domésticas, análisis de espacio de encabezado, equilibrio de carga como primitiva de red, arquitectura de control unificado para redes de paquetes y circuitos.
- En las redes móviles el aumento de tráfico ha sido exponencial. Además, el internet móvil sigue creciendo y el tráfico de video es más dominante que antes, por lo cual, mejoras en el ancho de banda, la eficiencia espectral y la latencia reducida se convierten en requisitos obligatorios. La convergencia de tecnologías y servicios como LTE con M2M/MTC/IoT, hacen posible el surgimiento de nuevas industrias.
- Entre las líneas futuras de investigación en 5G y LTE, se encuentra el análisis físico detrás de las ondas milimétricas, una investigación en profundidad del ambiente *outdoor*, el diseño de celdas basado en el ambiente, el diseño de antenas inteligentes, la arquitectura BF, los protocolos de alineamiento de HAZ, SDMA, SCMA, IDMA, FBMC, GFDM, HetNets, SDN, SON, CRN. Otra posibilidad es el diseño de mimo noma con matrices de canal de deficiente rango, o el estudio de desempeño de *outage*, de capacidad ergódica, de NOMA BF, NOMA con VLC o con codificación
- Las métricas de QoE se usan para mejorar la experiencia de usuario y por consiguiente mejorar la entrega de video y las técnicas y los algoritmos de procesamiento de video. Las diferentes métricas de QoE son interdependientes y su mejoramiento representa un desafío único; tema que vale la pena abordar en el futuro.
- Las tecnologías de virtualización crean una versión virtual de un recurso informático y hacen posible ejecutar múltiples sistemas operativos y múltiples aplicaciones en el mismo hardware simultáneamente, mejorando así la utilización y la flexibilidad del hardware. La virtualización disfraza la verdadera complejidad de la red al separarla en partes manejables independientes. Algunas propuestas de investigación futura son virtualización de redes, NaaS, SDN. A medida que funciones inteligentes se concentran en los bordes de las redes, otras formas de virtualización como NFV puede emerger como alternativa para la virtualización de la red, lo cual representa una posible línea de investigación.
- Las tecnologías digitales tienen dos caras: por un lado, un rol liberador y transparente, y por otro, uno intrusivo y restrictivo. Por ejemplo, el big data, que puede ser visto como la encarnación de los últimos avances en tecnologías digitales, manifiesta esta dualidad, poniendo en alto tensiones y fricciones de la modernidad.
- Uno de los desafíos en big data es el incremento continuo de datos; por lo tanto, el procesamiento oportuno de tales datos significa una ventaja relevante. En la misma dirección, los estándares y las interfaces para estas actividades también son necesarios.
- La seguridad es un tema sensible en IoT y, en general, en todos los sistemas de comunicaciones. Una de las herramientas usadas para proveer seguridad es la criptografía, siendo la criptografía de clave pública una de ellas. Este tipo de criptografía no puede ser aplicada en todas las capas de un sistema IoT debido a las restricciones de potencia informática de los dispositivos. Esto es un ejemplo de temática para investigaciones futuras, con el fin de hacer frente al gran desafío de la seguridad y la privacidad en *cloud* IoT.
- En el campo de las aplicaciones móviles, a pesar de la inminente presencia de malware, las soluciones contra ello no tienen los suficientes derechos para realizar revisiones agresivas de malware debido al modelo de seguridad del sistema operativo, en particular en lo referente a Android. Dado el incremento en firmas de apps malware, los métodos basados en firmas no son suficientes contra códigos criptográficos transformados. Entre las propuestas de investigación futuras se encuentran enfoques para cuidar los mercados de apps centralizados.
- La tendencia del aumento de movilidad sigue en proceso, y los de dispositivos inalámbricos son cada vez más importantes para acceder a la información. Las tecnologías se convierten en ubicuas y los dispositivos móviles aspiran a mejorar el desempeño y la flexibilidad en las comunicaciones. Por lo tanto, son importantes los esfuerzos para asegurar sistemas de comunicaciones con medidas de seguridad para que los usuarios puedan aprovecharlos al máximo.
- Los riesgos potenciales de vigilancia representan un área de interés para trabajos futuros, los riesgos a los que se enfrenta por ejemplo mVoIP y otros usuarios de dispositivos móviles, lo cual es un asunto que ha atraído la atención a nivel internacional, hasta el punto que la Agencia de Seguridad Nacional de Estados Unidos ha conducido a nivel gubernamental de alta escala vigilancia incluyendo aquellos que tienen en la mira internet, dispositivos móviles y usuarios de la nube.
- Este estado del arte deja por fuera muchos otros aspectos. Siguiendo la metodología de la revisión se ha destacado estos tópicos generales, sin embargo, existen aspectos puntuales que están siendo analizados e investigados para

dominios de aplicación en específico, por ejemplo, los servicios en entornos como la educación, la salud, el gobierno, el transporte y el entretenimiento, entre muchos otros.

- El Análisis bibliométrico ha mostrado que las tendencias investigativas asociadas a servicios de redes de telecomunicaciones tienden a incorporar alguna de las temáticas de Internet of Things - IoT, Big Data y Cloud Computing, concordando con la tendencia contemporánea de proveer servicios descentralizados y flexibles, que además puedan satisfacer necesidades modernas como las de las ciudades inteligentes.

REFERENCIAS

- [1] W. Xia, Y. Wen, C. Foh, D. Niyato, and H. Xie, "A Survey on Software-Defined Networking", IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, DOI 10.1016/J.ENG.2016.02.008.
- [2] M. Agiwal, A. Roy, N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey", IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016. DOI 10.1109/JIOT.2017.2647881.
- [3] P. Juluri, V. Tamarapalli, D. Medhi, "Measurement of quality of experience of video-on-demand services: A survey", IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, DOI 10.1145/2901739.2903508.
- [4] M. Díaz, C. Martín, B. Rubio, "State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of Internet of things and cloud computing", Journal of Network and Computer Applications, 2016, DOI 10.1109/ACCESS.2015.2437951.
- [5] H. Ekbia, M. Mattioli, I. Kouper, G. Arave, A. Ghazinejad, T. Bowman, V. Ratandeeep, A. Tsou, S. Weingart, C. Sugimoto, "Big data, bigger dilemmas: A critical review", Journal of the Association for Information Science and Technology, 2015.
- [6] F. Chen, P. Deng, J. Wan, D. Zhang, A., V. Vasilakos, X. Rong, "Data mining for the internet of things: Literature review and challenges", International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015.
- [7] R. Rahman, "Search Rank Fraud and Malware Detection in Google Play", IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2017, vol. 29, no.6, 1329-1342.
- [8] L. Delosières. "Infrastructure for Detecting Android Malware", Information Sciences and Systems, Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, 2013.
- [9] S. Scott, S. Natarajan, S. Sezer, "A survey of security in software defined networks", IEEE Comm. Surveys and Tutorials, 2016.
- [10] R. Mijumbi, J. Serrat, J. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, R. Boutaba. "Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges", IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, DOI 10.1016/j.heduc.2015.10.002.
- [11] L. Cui, R. Yu, Q. Yan, "When big data meets software-defined networking: SDN for big data and big data for SDN", IEEE Network, 2016, DOI 10.1016/j.jpdc.2014.08.003.
- [12] D. Li, J. Lin, A. Vasilakos, M. Imran, Z. Shu, J. Wan, "Security in Software-Defined Networking: Threats and Countermeasures", Mobile Networks and Applications, 2016, DOI 10.1155/2015/431047.
- [13] D. Kreutz, F. Ramos, P. Verissimo, S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey Proceedings of the IEEE", 2015, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X15003015>.
- [14] Y. Li, M. Chen, "Software-Defined Network Function Virtualization: A Survey", IEEE Access, 2015, DOI 10.1016/j.jnca.2016.10.013
- [15] V. Nguyen, T. Do, Y. Kim, "SDN and Virtualization-Based LTE Mobile Network Architectures: A Comprehensive Survey", Springer, 2015, DOI 10.1016/j.future.2016.11.031.
- [16] Z. Ding, Y. Liu, J. Choi, Q. Sun, M. Elkashlan, H. Poor, "Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks," IEEE Communications Magazine, 2017, DOI 10.1007/s10796-014-9492-7.
- [17] S. Islam, N. Avazov, O. Dobre, K. Kwak, "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges", IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, DOI 10.1109/JSAC.2016.2525418.
- [18] A. Haidine, S. El Hassani, "LTE-a pro (4.5G) as pre-phase for 5G deployment: Closing the gap between technical requirements and network performance", International Conference on Advanced Communication Systems and Information Security, ACOSIS, 2016, DOI 10.1109/COMST.2014.2386139.
- [19] D. Naboulsi, M. Fiore, S. Ribot, R. Stanica, "Large-scale mobile traffic analysis: A survey", IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, DOI 10.1109/BADGERS.2014.7.
- [20] R. Ratasuk, A. Prasad, Z. Li, A. Ghosh, M. Uusitalo. "Recent advancements in M2M communications in 4G networks and evolution towards 5G", 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks, ICIN, 2015, DOI 10.1007/s10660-015-9208-1.
- [21] A. Ghaffari, B. Akbari, H. Ghaeini, "A free-riding resiliency incentive mechanism for VoD streaming over hybrid CDN-P2P networks", 8th International Symposium on Telecommunications, IST, 2016, DOI 10.1109/MS.2014.50.
- [22] S. Ghalib, R. Mishra, A. Baghel, S. Sharma, "Routing protocol development for quality of service optimization of video-on-demand system over mobile ad hoc networks", International Journal of Communication Systems, 2018, DOI 10.1016/j.future.2016.11.010.
- [23] J. Arciniegas, D. Duran, "Una solución de VoD con IPTV en ambientes OTT para comunidades académicas virtuales Editorial", 2017, DOI 10.1109/ICST.2015.7102609.
- [24] M. Orlewilson, C. Hani, E. Luciano, "A concise review of the quality of experience assessment for video streaming Computer Communications", Elsevier, 2015, DOI 10.1109/COMST.2015.2453114 <http://ieeexplore.ieee.org/document/7150550/>.
- [25] J. Bruneau-Queyreix, D. Négru, J. Monga, E. Borcoci, "Multiple description-DASH: Pragmatic video streaming maximizing end-users' quality of experience", IEEE International Conference on Communications, ICC, 2016, <http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?VType=8&IType=5&JType=IJMET&PageNumber=3>.
- [26] M. Seufert, S. Egger, M. Slanina, T. Zinner, T. Hoßfeld, P. Tran-Gia, "A Survey on Quality of Experience of HTTP Adaptive Streaming", IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, DOI 10.1016/j.comnet.2014.11.008.
- [27] Z. Xia, X. Wang, L. Zhang, Z. Qin, X. Sun, K. Ren, "A Privacy-Preserving and Copy-Deterrence Content-Based Image Retrieval Scheme in Cloud Computing", IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2016.
- [28] M. Sookhak, A. Gani, Khan, M.K. Buyya, "Dynamic remote data auditing for securing big data storage in cloud computing", Information Sciences, 2017, DOI 10.1109/CC.2016.7559076.

- [29] Z. Xia, X. Wang, X. Sun, Q. Wang, "A Secure and Dynamic Multi-Keyword Ranked Search Scheme over Encrypted Cloud Data", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2016, DOI 10.1109/JSYST.2016.2544805.
- [30] H. Alshaer, "An overview of network virtualization and cloud network as a service", *International Journal of Network Management* (Wiley Online Library), 2015.
- [31] C. Mouradian, D. Naboulsi, S. Yangui, R. Glitho, M. Morrow, P. Polakos, "A Comprehensive Survey on Fog Computing: State-of-the-Art and Research Challenges", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2018.
- [32] P. Hu, S. Dhelim, H. Ning, T. Qiu, "Survey on fog computing: architecture, key technologies, applications and open issues", *Journal of Network and Computer Applications* (Elsevier), 2017.
- [33] G. Bello-Orgaz, J. Jung, D. Camacho, "Social big data: Recent achievements and new challenges", *Information Fusion*, 2016.
- [34] E. Xing, Q. Ho, P. Xie, D. Wei, "Strategies and Principles of Distributed Machine Learning on Big Data Engineering", Elsevier Ltd, 2016.
- [35] D. Gašević, S. Dawson, T. Rogers, D. Gasevic, "Learning analytics should not promote one size fits all: The effects of instructional conditions in predicting academic Internet and Higher Education", Elsevier, 2016.
- [36] M. D. Assunção, R. N. Calheiros, S. Bianchi, M. A.S. Netto, R. Buyya, "Big Data computing and clouds: Trends and future directions *Journal of Parallel and Distributed Computing*", Elsevier, 2015.
- [37] A. Botta, W. Donato, V. Persico, A. Pescapé, "Integration of Cloud computing and Internet of Things A survey", *Future Generation Computer Systems*, 2016.
- [38] G. Aloï, G. Caliciuri, G. Fortino, R. Gravina, P. Pace, W. Russo, C. Savaglio, "Enabling IoT interoperability through opportunistic smartphone-based mobile gateways", *Journal of Network and Computer Applications*, 2017.
- [39] C. Stergiou, K. Psannis, B. Kim, B. Gupta, "Secure integration of IoT and Cloud Computing", *Future Generation Computer Systems*, 2018.
- [40] D. Minoli, K. Sohraby, B. Occhiogrosso, "IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings-Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems", *IEEE Internet of Things Journal*, 2017.
- [41] S. Li, L. Xu, S. Zhao, "The internet of things: a survey", *Information Systems Frontiers*, 17(2), pp. 243-259, 2015.
- [42] M. Palattella, M. Dohler, A. Grieco, G. Rizzo, J. Torsner, T. Engel, "Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* (34(3),7397856, pp. 510-527), 2016.
- [43] P. Faruki, A. Bharmal, V. Laxmi, M. Conti, M. Rajarajan, "Android security: A survey of issues, malware penetration, and defenses" *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Volume 17, Issue 2, 1 April 2015, Article number 6999911, Pages 998-1022, 2015.
- [44] M. Lindorfer, M. Neugschwandtner, L. Weichselbaum, V. Veen, C. Platzer, "ANDRUBIS - 1,000,000 Apps Later: A View on Current Android Malware Behaviors Proceedings", *International Conference on Software Engineering. Proceedings - 3rd International Workshop on Building Analysis Datasets and Gathering Experience Returns for Security*, 2015.
- [45] A. Azfar, K. Choo, L. Liu, "Android mobile VoIP apps: a survey and examination of their security and privacy", *Electronic Commerce Research*, 2016.
- [46] K. Allix, T. Bissyandé, J. Klein, Y. Le Traon, "AndroZoo: Collecting millions of Android apps for the research community" *Proceedings - 13th Working Conference on Mining Software Repositories*, 2016.
- [47] H. Khalid, E. Shihab, M. Nagappan, A. Hassan, "What do mobile app users complain about?", *IEEE Software-IEEE Computer Society*, 2015.
- [48] C. D'Orazio, K. Choo, "Circumventing iOS security mechanisms for APT forensic investigations: A security taxonomy for cloud apps", *Future Generation Computer Systems*, 2018.
- [49] P. Kochhar, F. Thung, N. Nagappan, T. Zimmermann, D. Lo, "Understanding the test automation culture of app developers", *IEEE 8th International Conference on Software Testing, Verification and Validation, ICST*, 2015.
- [50] R. Kalaiprasath, R. Elankavi, R. Udayakumar, "Cloud security and compliance - A semantic approach in end to end security", *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Volume 8, Issue 5, May 2017, Pages 987-994, 2017.
- [51] S. Sicari, A. Rizzardi, L.A. Grieco, A. Coen-Porisini, "Security, privacy and trust in Internet of things: The road ahead" *Computer Networks*, 2015.
- [52] S. Islam, D. Kwak, M. Kabir, M. Hossain, K. Kwak, "The internet of things for health care: A comprehensive survey" *IEEE Access*, 2015.
- [53] M. Ali, S. Khan, S. A. Vasilakos, "Security in cloud computing: Opportunities and challenges", *Information Sciences*, 2015.
- [54] C. Yuan, X. Sun, R. Lv, "Fingerprint liveness detection based on multi-scale LPQ and PCA", *China Communications*, 2016.
- [55] D. He, S. Zeadally, N. Kumar, J. Lee, "Anonymous Authentication for Wireless Body Area Networks with Provable Security", *IEEE Systems Journal*, 2016.
- [56] N. Van-Eck, "Visualizing bibliometric networks", en R. R. Y. Ding, *Measuring scholarly impact: Methods and practice*, pp. 285-320, Springer, 2014.
- [57] N. Van-Eck, L. Waltman, "Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer", *Scientometrics*, vol. 111, no.2, pp. 1053-1070, 2017.
- [58] F. Tao, "CCIoT-CMfg: Cloud computing and internet of things-based cloud manufacturing service system", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, 1435-1442, 2014
- [59] Al-Fuqaha, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2347-2376, 2015.
- [60] M. Palattella, "Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 510-527, 2016.

Navegación de un robot móvil autónomo aplicado a la agricultura de precisión: Principios y aplicaciones de geolocalización en un cultivo de prueba

Ángel A. Rodríguez A.¹

John A. Figueredo L.²

Juan A. Chica G.³

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – Colombia

La agricultura de precisión es una técnica emergente en los últimos años aplicada a la agricultura, esta técnica se puede aplicar desde varios campos y funcionalidades (Hardware y software). Debido a esto en este trabajo se pretende mostrar los resultados preliminares de la investigación denominada “Robot móvil para la medición de variables medio ambientales aplicado en agricultura de precisión en el CEAD de Acacias” de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, en donde se muestra el desarrollo del tercer prototipo enfocado para la navegación de un robot por un cultivo de prueba, para el cual se desea mostrar los diferentes herramientas de Hardware y software que se han implementado para el reconocimiento de obstáculos en una ruta trazada y la prueba de distintos tipos de sensores tales como sensores de distancia ultrasónicos, brújula electrónica, GPS, procesamiento de imágenes y un sensor Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR), los cuales han permitido evaluar su funcionamiento en diferentes ambientes, con el fin de validar su aplicación en el robot y seleccionar los más adecuados para cumplir la tarea primordial de navegación autónoma, por otra parte, los sensores antes mencionados han dado lugar a la evaluación de diferentes plataformas de desarrollo como Arduino y Raspberry Pi, con el fin de realizar el control y procesamiento de cada uno de ellos. Por lo anterior en este avance del proyecto se ha logrado establecer que los sensores ultrasónicos son afectados por la humedad y temperatura en ambientes abiertos provocando lecturas falsas de distancia, la navegación por brújula electrónica es inviable debido a las concentraciones de hierro en el suelo provocando la pérdida del norte magnético; los sistemas de posicionamiento global GPS son viables cuando son de precisión pero a su vez inviables económicamente, el procesamiento de imágenes es inestable en ambientes no controlados por los cambios de luminosidad y el LIDAR hasta el momento el sensor más adecuado para cumplir esta función debido a su estabilidad en diferentes ambientes de temperatura, humedad y luminosidad, sin embargo, se estableció que el mejor sistema de navegación para el robot móvil es la intervención de varios sensores, como el procesamiento de imágenes realizado con la cámara Pixy2 y el sensor RPLIDAR A1, con el cual se puede tener rutas autónomas por parte del robot con un porcentaje de seguimiento del 81% en los recorridos, lo que concluye la necesidad de mejorar los algoritmos de programación y adecuación de filtros físicos y digitales de los sensores para un mejor funcionamiento de cada uno de ellos.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión es un conjunto de técnicas implementadas para medir, aplicar y corregir en el momento y lugar adecuado diferentes acciones en un cultivo, tales como insumos agrícolas, agua, nutrientes, pesticidas, podas, etc. [1]; basándose en la distribución de cantidades correctas de cada una de ellas, teniendo en cuenta la variabilidad espacial y temporal del terreno en aras de optimizar los costos de producción, minimizando insumos y maximizando la producción, fundamentándose principalmente en los datos geoespaciales y temporales del cultivo y no en la medida de los promedios históricos de los cultivos tradicionales. Estas técnicas se soportan en el uso de herramientas tecnológicas basadas en hardware y software tales como Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográfica (SIG); Percepción Remota o Telemedición; Tecnologías de dosis variable (sensores, controladores y actuadores) y análisis de datos georeferenciados (Geoestadística, Econometría Espacial, Análisis multifactorial, etc.). La adopción de este tipo de agricultura está en incremento con la finalidad de suplir las necesidades alimenticias de la población, además de ofrecer productos de calidad y suplir las exigencias de un mercado competitivo a precios más bajos, teniendo en cuenta un desarrollo sustentable y sostenible [2].

Por otra parte, la evolución de los diferentes sistemas electrónicos basados en microprocesadores y microcontroladores han generado un abaratamiento del hardware, adicionalmente, ha generado la posibilidad de incrementar el volumen de procesamiento de datos digitales y a su vez ha permitido optimizar significativamente la implementación de sistemas electrónicos inteligentes en la agricultura de precisión [3], tal es el caso de Arduino y Raspberry Pi. Estos sistemas embebidos surgieron de la necesidad de proveer un sistema económico, fácil de aprender y aplicar con cualidades y características suficientes para desarrollar proyectos de bajo costo a estudiantes, profesores y aficionados a la electrónica en diferentes campos de aplicación. Arduino es un sistema embebido basado en un microcontrolador bajo la premisa de Open hardware y Open Software basado en una comunidad de desarrolladores de código y librerías para el desarrollo de aplicaciones de bajo costo con el fin de suplir una necesidad específica dentro de una práctica, proyecto o automatización [4].

Raspberry Pi Foundation, al igual que Arduino, nació con la consigna de proveer un sistema computacional funcional de bajo costo con premisas de Open Software a las personas con el fin de incentivar el aprendizaje de la programación y motivar a niños y jóvenes para que estudien ingeniería informática, es así el caso de éxito que las diferentes tarjetas Raspberry Pi que se encuentran en el mercado, se están aplicando en proyectos de gran envergadura que necesiten algún tipo de procesamiento bajo algún software puesto que el consumo de energía es muy bajo a comparación de un

¹ angel.rodriguez@unad.edu.co

² john.figueredo@unad.edu.co

³ juan.chica@unad.edu.co

computador comercial [5], además de proveer un sistema pequeño que similar el tamaño de una tarjeta de crédito, permitiendo ser aplicado en espacios de tamaño reducido, adicionalmente, las tarjetas Raspberry Pi permiten una integración adecuada con las tarjetas Arduino ya que permite la comunicación entre ambos sistemas por diferentes puertos de comunicación.

El cambio climático que se presenta en el planeta, se ha ligado a la presencia del hombre y su evolución en los últimos 100 años en el ámbito de transporte, industrial y tecnológico, lo que ha llevado a presentarse el incremento de la temperatura sobre el planeta y cambios en el climáticos en diferentes regiones del mundo, variando las temperaturas de las estaciones y provocando que los cultivos no generen los mismos rendimientos de años anteriores, es así, como la agricultura tradicional o los conocimientos sobre la misma que se ha transmitido tras cada generación de agricultores no está obteniendo los mismos resultados, puesto que el incremento de la temperatura sobre el planeta trae consigo cambios colaterales en las condiciones de los suelos, periodos más largos de verano o invierno, sequia de afluentes hídricos, entre otros factores. Por tal motivo, para los agricultores ya no es suficiente con tener sistemas de información ambientales generales como los ofrecidos por los sistemas meteorológicos nacionales y regionales, sino que ya se hace relevante la adopción de sistemas locales de medición de las variables ambientales dentro de una zona geográfica determinada con el fin de aplicar las medidas correctivas en poco tiempo y prever los cambios en las variables que se pueden presentar en pequeños intervalos de horas o días en aras de asegurar una cosecha productiva y rentable, para ello se hace innegable la adopción de lo conocido hoy en día como agricultura de precisión [16].

Los sistemas aplicados a la agricultura de precisión, puede ser desde en sistema de medición de variables en tierra en un punto fijo, como por ejemplo una estación meteorológica o sistemas más complejos como lo es el uso de drones terrestres o aéreos con la capacidad de medir variables ambientales, capturar imágenes y hacer procesamiento de imágenes para brindar un diagnostico en tiempo real sobre el terreno. Es por ello que esta investigación nació de un desarrollo previo de una estación meteorológica implementada con herramientas IoT en el CEAD de Acacias prototipo que se puede apreciar en la Figura 1 ubicado en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, la cual se basaba en la toma de medidas de 6 variables climáticas como temperatura, humedad relativa, índice UV, sensor de lluvia, potencia solar y brillo solar, aplicando IoT, permitiendo visualizar los datos de cada una de las variables en una página web en la que se actualizaba la información cada 10 minutos [6].



Figura 1. Prototipo de estación meteorológica del CEAD de Acacias

Por otra parte, para tener una mayor cobertura sobre un terreno específico, se proyectó la necesidad de medir dichas variables ambientales dentro de un cultivo real, ya que las variables mencionadas anteriormente pueden variar en pequeñas extensiones de tierra, generando microclimas como, por ejemplo, sombras de nubes, árboles o montañas aledañas al cultivo o pequeñas alteraciones de la tierra como orillas de ríos, cercanía del terreno sobre una montaña, entre otras. Por tal motivo, se pretende desarrollar en esta nueva investigación un prototipo de robot móvil que sea capaz de navegar de manera autónoma por un cultivo de prueba para que cumpla con la toma de las mediciones de cada uno de los parámetros mencionados anteriormente y algún parámetro adicional que sea requerido medir para un cultivo en específico, para este se implementó una base robótica de cuatro ruedas con tracción individual diferencias 4WD de muy básico diseño con el que se realizaban algunas aproximaciones a las topologías y condiciones del terreno de prueba Figura 2.



Figura 2. Prototipo de robot móvil terrestre aplicado a la agricultura de precisión en el CEAD de Acacias.

2. DISEÑO DEL ROBOT

2.1 Diseño de una plataforma robótica

Para el diseño de la plataforma robótica se estudiaron varios sistemas de tracción aplicados en robots móviles. Los sistemas probados para la locomoción del robot en diferentes terrenos fueron los de sistemas de orugas cuya presentación se encuentra en la Figura 3, tracción diferencial 2WD, tracción diferencial 4WD. Luego de diferentes pruebas de funcionamiento en campo, se comprobó que el sistema de oruga era demasiado rápido y con mucha fricción, adicionalmente, ofrecía bastante resistencia al avance en las curvas y chocaba en algunos casos con los obstáculos naturales del camino.

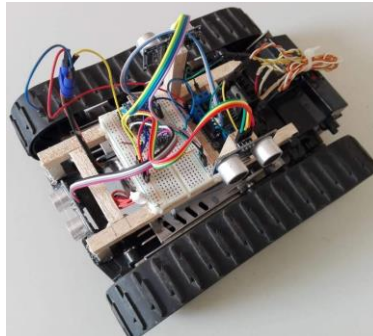


Figura 3. Diseño de plataforma robótica con sistema de orugas

Por otra parte, el desarrollo de la plataforma robótica basada en el sistema de tracción diferencial 2WD el prototipo de la Figura 4, no presento mejorías en el desplazamiento, puesto que al ser solo tracción en dos ruedas, se hace necesario de un rueda de apoyo comúnmente conocida como rueda libre, pero este sistema no funciona sobre adecuadamente sobre la tierra ni tampoco sobre el pasto, normalmente, este sistema es implementado en pequeños robots que se desplazan sobre superficies planas y lisas que no ofrezcan mayor oposición al avance.

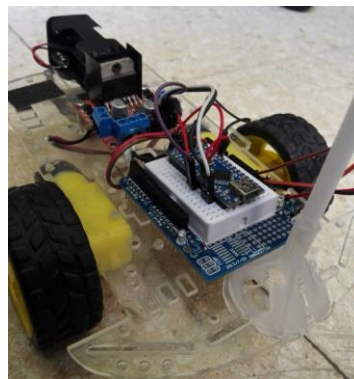


Figura 4. Diseño de plataforma robótica con tracción diferencial 2WD

El sistema de tracción diferencial 4WD, arrojó los mejores resultados para la navegación en terrenos irregulares con presencia de tierra, piedras y grama, además, que las ruedas seleccionadas ayudaron a mejorar la tracción por la ruta trazada, lo que permitió validar la opción de continuar con este sistema hasta alcanzar el prototipo final, en la Figura 5 (izquierda) puede verse una primera versión, en la que se bien la relación funcional era aceptable, al realizarse las modificaciones en durabilidad del chasis evidentes en la Figura 5 (derecha), y en el uso de ruedas más adaptables para el terreno y topografía del campo de prueba, los resultados de navegabilidad y estabilidad mejoraron considerablemente.

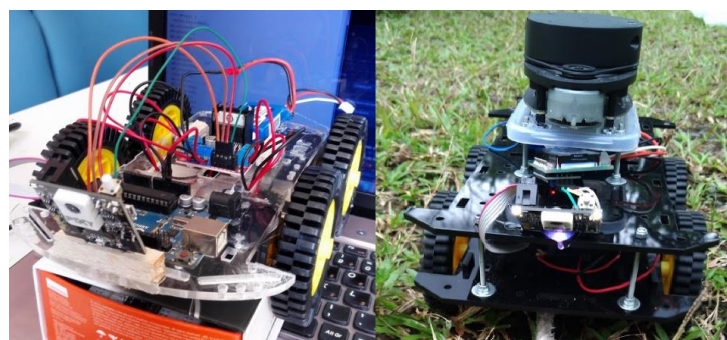


Figura 5. Diseño de plataforma robótica, (Izquierda) primer prototipo, (Derecha) prototipo final

2.2 Elección de los sensores para el sistema de navegación

En la actualidad, existe un gran número de sensores electrónicos que pueden ser implementados para la navegación de un robot móvil, desde un simple sensor ultrasónico de distancia HC-SR04, hasta un sensor LIDAR y/o GPS (Sistema de Posicionamiento Global), que permite darle una posición geoespacial dentro de un terreno. Por otra parte, la condición del uso de cada uno de estos sensores depende de varios factores, como los costos del sensor, funcionalidad, operatividad y una de las más importantes, las perturbaciones (ruido) provocadas por el medio en que se estén utilizando. A continuación, se listan los diferentes sensores comprobados en campo para ubicar el robot dentro de un cultivo de prueba.

- *Sensor de distancia ultrasónico HC-SR04:* Este sensor es uno de los más básicos y económicos del mercado, el cual sirve para medir la distancia de un objeto dentro de un rango de 2cm a 400cm por medio de sonido ultrasónico, su funcionamiento se basa en la emisión de una señal de 40Khz y mide el tiempo en que esta señal viaja por el aire y retorna cuando ha detectado un objeto dentro del rango de operación [7], este sensor es muy básico y para tener un sistema de localización dentro de un terreno se hace necesario de al menos tres sensores de este tipo para hacer una triangulación y determinar su ubicación dentro del cultivo. La principal desventaja de este sensor se presenta en que las mediciones son perturbadas debido a la temperatura del ambiente, puesto que existe humedad en el suelo, esta se evapora provocando que el sensor mida obstáculos donde realmente no hay uno, en la Figura 6, se tiene una imagen del uso de este sensor como prueba para la navegación en el robot de tracción diferencias 2WD.

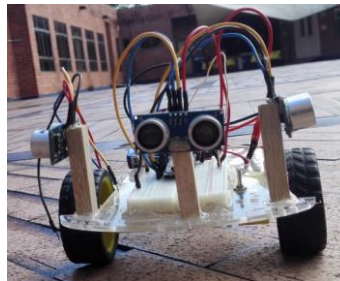


Figura 6. Prueba del sensor ultrasónico en ambientes no controlados

- *Brújula digital HMC5883L:* es un sensor magnetómetro de 3 ejes, con el cual se puede medir el campo magnético presente donde está ubicada la brújula digital, de esta forma conociendo la dirección del campo magnético terrestre se puede calcular la orientación respecto del norte magnético, este sensor es de bajo costo y se puede utilizar en aplicaciones de orientación y magnetometría, vale la pena resaltar, que dependiendo de la ubicación geográfica del sensor, se hace necesaria la corrección del norte geográfico con respecto del norte magnético puesto que el norte magnético no está apuntando directamente al norte geográfico a esto se le llama para realizar esta corrección se debe tener en cuenta la ubicación geográfica, para este caso en Acacias - Meta es de $+0.15^\circ$ [8]. La principal desventaja de esta brújula se presenta cuando el sensor está cerca de metales o si el suelo presenta un alto contenido de hierro provoca que la brújula cambie su norte magnético haciendo perder la orientación del robot, el sistema implementado sobre el robot se encuentra en la Figura 7, en donde la brújula digital fue ubicada en un punto superior al robot.

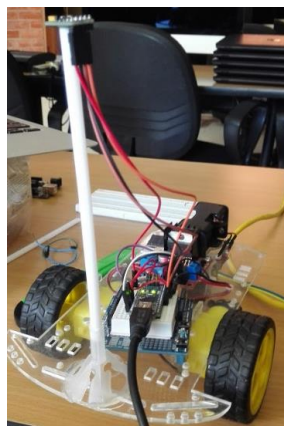


Figura 7. Prueba de la brújula en el prototipo de robot móvil

- *GPS NEO-6M (GY-GPS6MV2):* es un receptor de señal GPS (Sistema de Posicionamiento Global) de bajo costo, y de bajo consumo energético, soporta diferentes protocolos de comunicación como UART, SPI, I2C (12C) y USB, es ideal para aplicaciones de bajo costo y consumo energético ver Figura 8, además de su reducido tamaño, tiene una frecuencia máxima de muestreo de 5Hz y la precisión en posición es de 2.5m, en velocidad 0.1m/s y en orientación 0.5° [9]. La principal desventaja de este receptor GPS en las pruebas realizadas, es la precisión que es

de 2.5m, cabe resaltar que es 2.5 metros a redonda del punto, lo que significa que el error total puede llegar a los 5 metros, además, la dificultad de la recepción en días nublados impide una buena recepción de los satélites y a su vez se baja la precisión de la medida.

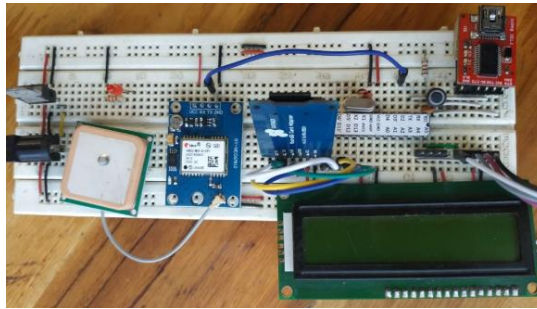


Figura 8. Prueba del receptor GPS con módulo microSD montado en el robot móvil

- *Pixy2:* La pixy2 (CMUcam5) es la segunda versión de Pixy, es una cámara con un procesador interno de 204MHZ de doble núcleo que es capaz de reconocer colores, objetos, formas, líneas y algunos códigos QR, esta cámara se puede comunicar por varias interfaces como SPI, I2C, UART, USB o salida analógica / digital, es compatible con diferentes plataformas como Arduino, LEGO, Raspberry PI, BeagleBone, entre otras [10], al tener un preprocesamiento de imágenes incluido, baja la carga computacional para el procesamiento de imágenes con sistemas computacionales como Raspberry Pi + OpenCV [11], en la Figura 9 puede verse en la parte frontal del robot mejorado de tracción diferentes 4WD el montaje de la cámara, esta se puede trabajar directamente en Arduino por el puerto de comunicación ICSP. La principal desventaja de la Pixy2 es el cambio de luz ambiente cuando se realizan las pruebas, aunque estas se pueden configurar gracias al software soportado para PC, lo que la convierte en una herramienta muy útil si se configura correctamente todos los parámetros.

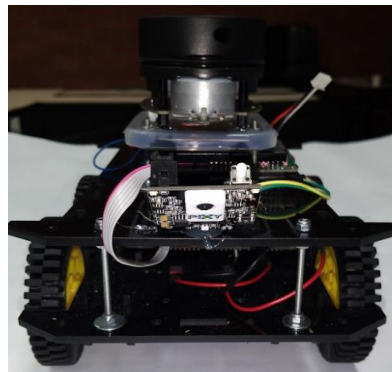


Figura 9. Prueba de la Pixy2 en el prototipo de robot móvil

- *RPLIDAR A1 360° Laser Range Scanner:* Es un escáner de alcance laser, el cual puede medir distancias de forma omnidireccional a 360°, puede llegar a tomar 8000 muestras por segundo y medir distancias de hasta 12 metros, es muy utilizado en sistemas robóticos para navegación autónoma [12], como robots aspiradores y vehículos autónomos, por otra parte, el costo del sensor es de aproximadamente \$100 dólares, lo que lo convierte en un sensor bastante económico para sus prestaciones. La principal desventaja sobre las pruebas realizadas es que al ser tan preciso toma muestras menores a un 1 grado, lo que lo convierte en un sensor que toma muestras muy exactas de distancia en algún grado determinado, por otra parte, la distancia mínima de medición comprobada es de 13cm, lo que no le permite medir distancias muy cortas. Hasta el momento es el sensor para navegación que ha tenido mejores resultados, su implantación en el robot se encuentra en la Figura 10.

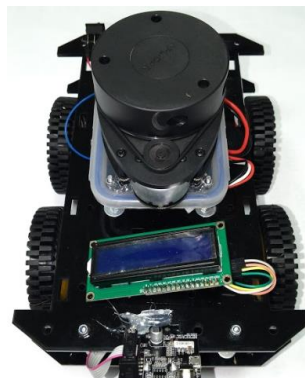


Figura 10. Prueba del LIDAR A1 en el prototipo de robot móvil

3. RESULTADOS

Los resultados preliminares obtenidos de la navegación del robot por el cultivo se exponen de acuerdo a los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de los sensores utilizados en todas las pruebas, lo que siempre conllevaba a probar otras soluciones con distintos tipos de sensores ya que no se lograba un posicionamiento local y/o global del robot dentro del cultivo, por esa razón se hizo la transición con diferentes instrumentos y sensores para el posicionamiento del robot. A continuación, se muestran los resultados obtenidos por cada prueba realizada.

3.1 Navegación con sensores Ultrasónicos HC-SR04

El intento del posicionamiento del robot por medio de sensores ultrasónicos se basó sobre la idea de tener un set - point sobre el eje x por medio de dos sensores ultrasónicos ubicados a cada lado del robot, y uno en la parte frontal apuntando directamente sobre el eje Y+, para lo cual se esperaba que los bancales del cultivo de prueba distanciados a 50 cm sirvieran como puntos de referencia y ubicación esto según la presentación que se hace en la Figura 11.

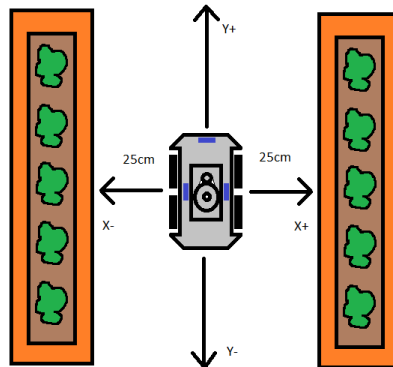


Figura 11. Representación funcionamiento del sensor

El algoritmo que se diseñó, era capaz de mantener el robot en el centro del camino con la ayuda de un controlador PID, los sensores ultrasónicos son los dispuestos de color azul en la imagen, las pruebas se realizaron bajo ambientes controlados, bajo techo, temperatura ambiente controlada, sin cambios de luz. pero cuando se hizo la prueba en el exterior con bastante cantidad de sol, altas temperatura y humedad en el ambiente, se presentaban errores en las lecturas, lo que provocaba que el robot no mantuviera su rumbo en el centro del cultivo, lo que se percató que se presentaban medidas de obstáculos cuando no había en presencia de la humedad o vapor de agua, por lo cual no fue factible implementar este sistema de navegación.

3.2 Navegación con brújula digital HMC5883L

La implementación de este sensor para navegación del robot móvil se pensó desde la percepción de seguir rumbos fijos, ubicándose por medio de la brújula los ejes del Norte, Sur, Este y Oeste, además de la implementación de un medidor de distancia por medio de un encoder para el robot, para este supuesto, se esperaba tener delimitado el cultivo de prueba para saber las distancias que fuesen necesarias desplazarse y los giros que se deberían realizar con la ayuda de la brújula. Por otra parte, en las pruebas preliminares, que se hizo con el prototipo del robot no se pudo establecer el norte geográfico de una manera estable a pesar que se ubicó la brújula digital de la Figura 12 a una altura de 30 cm del suelo para evitar mediciones erróneas por la presencia de metales en el suelo o concentración de hierro en la tierra, a pesar de se realizaron diferentes pruebas, el norte geográfico siempre presento variaciones, lo que provocaba que el robot constantemente se dirigiera a nortes geográficos desfasados del norte geográfico real.

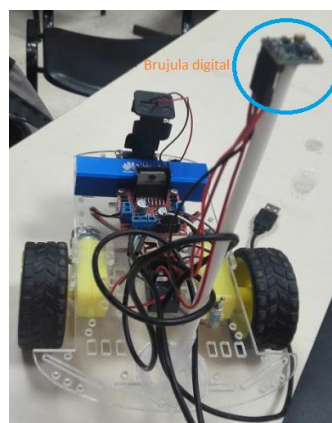


Figura 12. Ubicación de la brújula digital en el prototipo de robot 2WD

3.3 Navegación con GPS NEO-6M (GY-GPS6MV2)

La implementación del receptor GPS NEO-6M, prometía ser una solución definitiva para la ubicación geoespacial del robot dentro del cultivo, ya que se pretendía tomar la ruta por medio de un GPS patrón en los puntos de la trayectoria que debía tomar el robot móvil, y así programar al robot para que siguiera la ruta programada por el usuario, en este caso, se realizaron las pruebas con el GPS seleccionado y se encontró con errores en las mediciones de Latitud y Longitud dentro de los rangos establecidos por el fabricante.

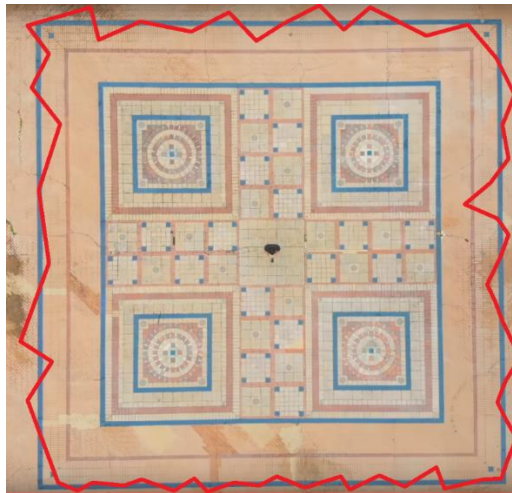


Figura 13. Ubicaciones GPS obtenida por la navegación del robot móvil y el GPS NEO-6M

Se trazó una ruta en el la Universidad Nacional Abierta y a Distancia del CEAD de Acacias, en el salón principal al aire libre Figura 13, ya que según su disposición de las Figuras geométricas que posee en su piso, se lograba tener un cuadrado perfecto (cuadro de color azul), se programó y se hizo un recorrido con el robot por este cuadro con la ayuda de un módulo para una tarjeta microSD para Arduino, para luego tomar las coordenadas de latitud y longitud en cada punto y obtener su posición en Google Earth [13], para lo cual se obtuvo la ruta tomada (Línea Roja) de las posiciones del GPS, lo que se puede evidenciar claramente desviaciones de ruta real en algunos casos de más de 1.5 metros, a pesar de que las medidas se hicieron en buen clima, lo que determino descartar el uso de este receptor GPS para la navegación del robot.

3.4 Navegación con Pixy2

La cámara Pixy2, entrega un pre-procesamiento de imágenes bastante robusto para la aplicación como puede observarse en la Figura 14, puesto que el procesamiento de imágenes de cualquier tipo requiere de una alta carga computacional y herramientas de software dedicadas para esta operación como por ejemplo la librería OpenCV de Intel [11], lo que permite el ahorro de hardware y carga computacional a la hora de reconocer un objeto dentro de una imagen, esta cámara ha proporcionado al robot móvil la capacidad de seguir una cuerda de color blanco, para el apoyo del trazado de la ruta n el cultivo de prueba, lo que con una buena configuración de los parámetros de la cámara, se tiene un 81% de los recorridos ejecutados por el robot dentro del cultivo, a pesar de las variaciones de luz que se puedan presentar en el terreno, lo anterior teniendo en cuenta que la cámara también tiene luz propia para mejor iluminación.

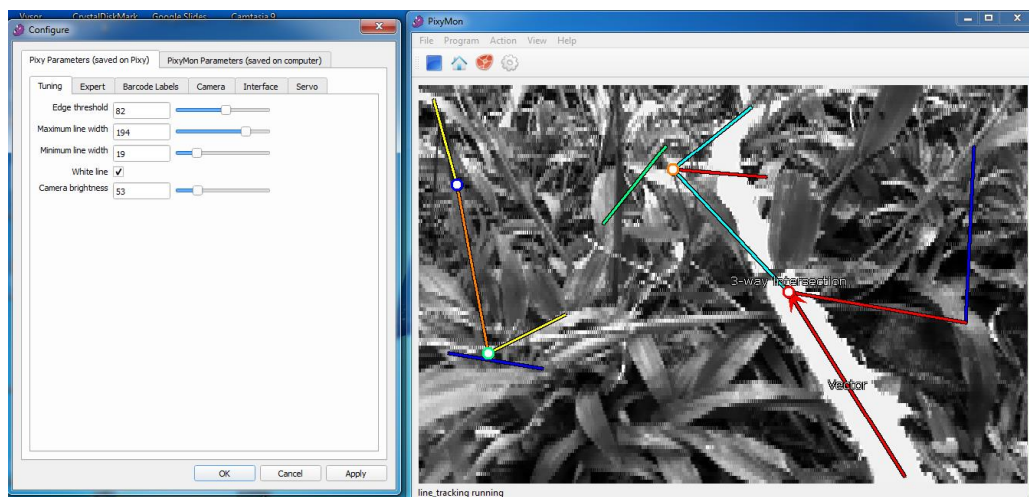


Figura 14. Reconocimiento de vectores de posición de la Pixy2 sin sintonización de parámetros

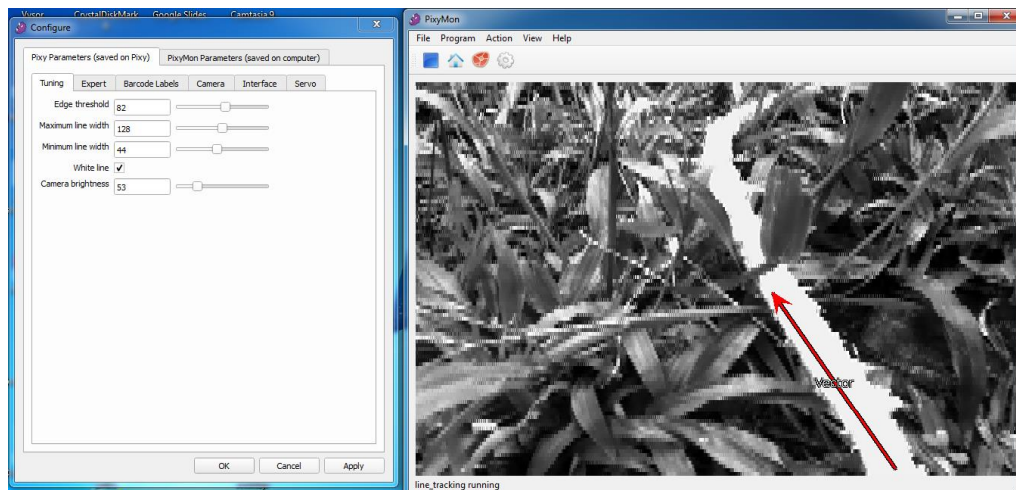


Figura 15. Reconocimiento de vectores de posición de la Pixy2 con sintonización de parámetros

La pixy2 ofrece una buena respuesta a la sintonización de los parámetros normales y de experto que se proveen para su configuración ajuste que puede verse en la Figura 15, por otro lado, se puede apreciar que a comparación de otros sensores de línea la superficie no necesita ser uniforme, del mismo color o que la línea se interrumpa, logrando ser un sensor optimo en aplicaciones de reconocimiento de objetos. Por otro lado, como se aprecia en la secuencia de la Figura 16, donde se puede apreciar la navegación del robot por el cultivo de prueba.



Figura 16. Navegación del robot con la Pixy2, (A) Ingresando al cultivo, (B) Dentro del cultivo, (C) Saliendo del cultivo, (D) Girando a la siguiente parcela

3.5 Navegación con RPLIDAR A1 360° Laser Range Scanner

La navegación con el sensor laser RPLDAR A1 presentó buenos resultados a la hora de hacer las pruebas de medición, las pruebas preliminares se realizar al seguimiento de una pared y mantuviera una distancia de 50cm de la pared por medio de un controlador digital PID, el cual funciona perfectamente, la dificultad se presentó cuando se comprobó su funcionamiento sobre el cultivo de prueba, como el sensor mide a ángulos inferiores a 1 grado existe en algunos casos mediciones entre los arbusto que son superiores a los 50cm, en algunos casos hasta un metro cuando toma de referencia el siguiente arbusto que está en el otro bancal, este fue el mayor desafío de la navegación ya que en un cultivo real, no se tendrá una pared que sirva de guía sino de los tallos de las plantas [15].

En la Figura 17, se puede apreciar el haz del láser (Líneas de color rojo) tomando las mediciones a distintos grados dentro del cultivo de prueba, como se observa no todos los haces de luz del láser inciden sobre los arbustos del cultivo de prueba, lo que hace que el error del PID posea variaciones demasiado grandes, ocasionando perturbaciones en las variables K_i , K_P , y K_D que sea imposible una sintonización óptima. Por esta razón, actualmente se está trabajando en la virtualización de una ruta digital con la ayuda del sensor RPLIDAR A1, para así generar una carretera virtual que sea capaz de ubicar al robot dentro del cultivo de prueba.

La virtualización de las distancia es triángulos de posición tomando los puntos más cercanos de los obstáculos, permitirá generar los "Triángulos de posición" como los encontrados en la Figura 18, puesto que el RPLIDAR proporciona la distancia con de un obstáculo con su respectivo ángulo relativo del sensor, adicionalmente, con la ayuda del teorema de Pitágoras, Teorema de Senos y Teorema de los Cosenos, se podría determinar todos los lados

del triángulo para su posterior cálculo del área, para al final sumarlas y así tratar de determinar un área rectangular de la carretera virtual y posicionar el robot en toda la mitad, así se podría corregir las mediciones que están por fuera de la separación entre arbustos paralelos y posicionar el robot dentro del cultivo de manera local.



Figura 17. Mediciones con el Laser del RPLIDAR en el cultivo de prueba

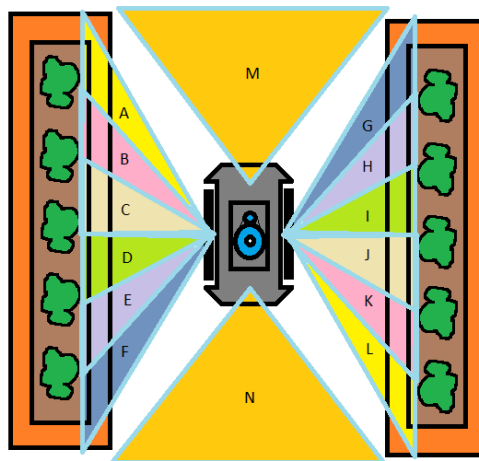


Figura 18. Propuesta de carretera virtual a partir de áreas de triángulos de posición

4. CONCLUSIONES

Este avance del trabajo sobre la navegación de un robot móvil aplicado a la agricultura de precisión, muestra cómo ha sido el avance para encontrar los sensores electrónicos más adecuados e idóneos para cumplir con la función principal de la navegación, por otra parte, debido a la complejidad del terreno, condiciones ambientales, condiciones de luminosidad se hace necesario implementar sensores más costosos que los que normalmente se utilizan en electrónica para pruebas de laboratorio, ya que en un laboratorio se ajustan a situaciones constantes y controladas, lo que hace que cualquier tipo de sensor opere de manera correcta y de acuerdo a las características proporcionadas por el fabricante, las cuales normalmente no son comprobadas bajo diferentes ambientes.

La navegación de un robot por un ambiente no controlado, hace despertar cada vez el ingenio de los investigadores con el fin de buscar soluciones a diferentes barreras que se presentan en la ejecución de un proyecto, lo que lo hace salir de su zona de confort en cuanto a los conocimientos sobre electrónica que posee, en este caso en los sensores tradicionales y lo hace buscar otros tipos de equipos desconocidos que puedan servir para la finalidad del proyecto.

En el desarrollo preliminar de este proyecto, se puede validar la necesidad de utilizar varios sistemas electrónicos que puedan ayudar a la localización del robot, ya que un solo sistema no es suficiente para dar certeza de una navegación correcta, para esta investigación se concluye que los dos sensores mínimos que se necesitan para hacer una navegación óptima y superar el 81% de las pruebas con seguimiento correcto de la ruta son la Pixy2 y el RPLIDAR, ya que ambos pueden trabajar en conjunto cuando alguno de ellos pierda la ruta para lo que fue programado.

La navegación de robots móviles en ambientes no controlados presentan un gran reto de ingeniería, en el cual se hace necesario la dedicación de un gran número de horas de investigación, un equipo de trabajo idóneo, recursos económicos y lo más importante la validación de funcionamiento mediante pruebas de campo en diferentes escenarios, es así como diferentes empresas como Bosch, Audi, Continental, Ford, General Motors, BMW, Toyota, Volkswagen, Daimler y Google, invierten millones de dólares en investigación para lograr el manejo autónomo de sus vehículos, lo anterior teniendo en cuenta el número de patentes en esta área [14].

REFERENCIAS

- [1] E. Garcia y F. Flego, «Agricultura de precisión,» *Revista Ciencia y Tecnología*, vol. 1, n° 8, pp. 99-116, 2008.
- [2] R. Bongiovanni, E. Mantovani, S. Best y Á. Roel, «¿Qué es la agricultura de precisión?,» de *Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*, Montevideo, Procisur/IICA, 2006, pp. 15-17.
- [3] D. Garcia, G. Martinez y M. Garcia, Raspberry Pi y Arduino: semilleros en innovación tecnológica para la agricultura de precisión,» *Informática y Sistemas: Revista de Tecnologías de la Informática y las Comunica.*, vol. 2, n° 1, pp. 74-82, 2018.
- [4] Arduino, «Arduino,» Arduino, 10 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs>. [Último acceso: 2 Mayo 2019].
- [5] Raspberry Pi Foundation, «Raspberry Pi,» Raspberry Pi Foundation, Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/about/>. [Último acceso: 8 Mayo 2019].
- [6] E. Serna, «Selección e implementación de un prototipo de estación meteorológica aplicando IoT y herramientas Google,» de *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, Medellín, Instituto Antioqueño de Investigación, 2016, pp. 341-352.
- [7] Mouser Electronics, «ElecFreaks,» 20 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://www.mouser.com/ds/2/813/HCSR04-1022824.pdf>. [Último acceso: 12 Julio 2018].
- [8] NOAA, «NOOA,» NOAA, 10 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [9] u-blox, «u-blox,» 20 Octubre 2014. [En línea]. Available: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf. [Último acceso: 18 Febrero 2018].
- [10] Pixy, «Pixy,» 12 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://pixycam.com/>. [Último acceso: 10 Octubre 2018].
- [11] Rodriguez, J. Figueredo y J. Chica, «Sistema de reconocimiento de maduración del tomate, mediante el procesamiento de imágenes,» de *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, Medellín, Editorial Instituto Antioqueño de Investigación, 2018, pp. 174-181.
- [12] Shanghai Slamtec Co., «RPLIDAR A1,» Shanghai Slamtec Co., 12 Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://www.slamtec.com/en/lidar/a1>. [Último acceso: 12 Noviembre 2018].
- [13] Google, «Google Earth,» Google, 20 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://earth.google.com/web/>. [Último acceso: 15 Mayo 2018].
- [14] Hearst Magazines International, «Car and Driver,» Hearst Magazines International, 18 Enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.caranddriver.es/coches/planeta-motor/las-10-marcas-que-mas-investigan-sobre-el-coche-autonomo>. [Último acceso: 12 Abril 2019].
- [15] A. Velasquez, V. Higuti, H. Borrero, V. Gasparino, D. Magalhães, V. Aroca, y M. Becker, «Reactive navigation system based on H ∞ control system and LiDAR readings on corn crops», *Precision Agriculture*, vol. 20, n° 105, pp. 1-20, 2019.
- [16] A. Beltran Encio, J. A. Chica Garcia and J. Cifuentes, «Influence of man on the meteorological conditions of the CORONCORO wetlands located in the city of Villavicencio using multiparameter datalogger and IoT technology», 2018 Congreso Argentino de Ciencias de la Informática y Desarrollos de Investigación (CACIDI), Buenos Aires, 2018, pp. 1-5.

Estudio de eficiencia del alumbrado público en la ciudad de Villavicencio

Jefferson Parra C.¹

Pedro L. Muñoz O.²

Luis M. Pulido O.³

Corporación Universitaria del Meta UNIMETA – Colombia

En este capítulo se presenta el estudio de eficiencia realizado a las luminarias led que reemplazaron las de sodio en algunas avenidas de la ciudad de Villavicencio. Para empezar, se hablará del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (Retilap) vigente, los niveles que exige para los diferentes tipos de vías y la forma de medir los niveles. Al finalizar, se realizará un análisis técnico donde se presenta los niveles obtenidos en las mediciones hechas en campo y los problemas ocasionados debido a los bajos niveles.

1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta el desarrollo y crecimiento de Villavicencio, y el impacto que produce la generación de energía eléctrica en Colombia, en donde uno de las principales fuentes de consumo es la iluminación, se ve necesario analizar el uso eficiente de esta fuente de consumo, y como uno de sus principales focos, el del alumbrado público que tiene un gran porcentaje de participación en el consumo debido a que permanecen 12 horas prendidas, todos los días del año. Estudiar el comportamiento y cumplimiento de los parámetros eléctricos debido al cambio de tecnología de sodio a led, nos llevaría a observar el ahorro de consumo de potencia por luminaria cumpliendo con los parámetros mínimos exigidos por los reglamentos.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio de eficiencia de alumbrado público en la ciudad de Villavicencio. Para el desarrollo de este documento, se contará con la ayuda de los estudiantes de ing. Eléctrica de la Corporación Universitaria del Meta UNIMETA. Lo primero que se realizó, fue una capacitación a los estudiantes sobre Retilap y Dialux con el fin de que conocieran sobre la normatividad y simulaciones. Luego se realizó trabajo de campo en donde se tomaron datos como ancho de vía, tipo de vía, tipo de luminaria, potencia, altura de postes, interdistancia, entre otros. Al final se comparan estos datos con los obtenidos con el Dialux, donde se calculan los niveles de iluminación.

2. MARCO TEÓRICO

En los últimos años, Villavicencio ha venido cambiando el tipo de tecnología de las luminarias, por tecnología de menor consumo como las luminarias led. Aunque el costo inicial de las luminarias led, comparada con las de Sodio, es alto, el ahorro en energía por luminaria, mayor vida útil, el confort y calidad de vida de los usuarios, compensa el alto costo de estas luminarias, según catálogos de fabricantes. A partir de la entrada en vigencia del Retilap desde 2010, y debido a los avances tecnológicos en las luminarias en pro de la conservación del medio ambiente, se ve necesario el reemplazo del tipo de tecnologías existentes (Sodio y mercurio) y el análisis del impacto (social, económico y ambiental) que origina este cambio de luminarias.

Para Villavicencio, ya se ha realizado un estudio del estado de la iluminación, pero este trabajo estaba enfocado al uso de energías renovables (paneles solares y energía eólica) como fuente de alimentación. Es así, que, en el año 2014, los estudiantes Javier Alexander Montero y Julián Gómez, quienes eran estudiantes de la Universidad de la Salle (Bogotá), realizaron una tesis de pregrado que tenía por título: Evaluación de Soluciones Energéticas para Alumbrado Público en Villavicencio (Meta), en donde se analizaron tres (3) avenidas de la ciudad, y propusieron la alimentación del alumbrado a partir de paneles solares y aerogeneradores verticales.

- *Retilap.* El Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público establece las reglas generales que se deben tener en cuenta en los sistemas de iluminación interior y exterior, y dentro de estos últimos, los de alumbrado público en el territorio colombiano, inculcando el uso racional y eficiente de energía (URE) en iluminación.
- *Alumbrado Público.* La Comisión de Regulación de Energía y Gas, mediante resolución No. 122 de 2011 artículo 1º, definió Alumbrado Público como el servicio público no domiciliario que se presta con el objeto de proporcionar exclusivamente la iluminación de los bienes de uso público y demás espacios de libre circulación con tránsito vehicular o peatonal, dentro del perímetro urbano y rural de un municipio o Distrito.
- *Luminarias led.* Es una lámpara de estado sólido que usa leds (Light-Emitting Diode, diodos emisores de luz) como fuente lumínica. Debido a que la luz capaz de emitir un led no es muy intensa, para alcanzar la intensidad luminosa similar a las otras lámparas existentes como las incandescentes o las fluorescentes compactas las lámparas LED están compuestas por agrupaciones de leds, en mayor o menor número, según la intensidad luminosa deseada [5].

¹ jefferson.parra@unimeta.edu.co; jefferson_parra@msn.com

² pedro.munoz@unimeta.edu.co; pplochoa@gmail.com

³ luis.pulido@unimeta.edu.co

- **Calidad de la Energía.** Se puede definir como una ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicos en la red y variaciones de voltaje rms suministrado al usuario; esto concierne a la estabilidad de voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico [1].
- **Armónicos.** Significa simplemente que la forma de onda de la tensión (o corriente) no es una senoidal pura. Esto resulta de la adición de una o más ondas armónicas que se superponen a la onda fundamental o de 60Hz. La existencia de armónicos en la red de distribución provoca aumento de las pérdidas en equipos por efecto Joule, con el consecuente aumento de temperatura, sobre esfuerzo en aislamientos y disturbios provocados por interferencias en circuitos de control, de protecciones y en sistemas de telecomunicaciones.

2. MÉTODO

La metodología para la medición de la luminancia en las vías de Villavicencio, es la nombrada en el Retilap [4]. Este reglamento, clasifica el tipo de vías de acuerdo a las características de las vías, siendo las principales: la velocidad de circulación y el número de vehículos. Toda vía caracterizada con estas dos variables se les asignará un tipo de iluminación conforme al Retilap (Tabla 1).

Tabla 18. Clases de iluminación para vías vehiculares del Retilap [4]

Iluminación	Vía	Velocidad circulación (Km/h)		Tránsito vehículos T (Veh/h)	
M1	Autopistas y carreteras	Extra alta	V>80	Muy importante	T>1000
M2	De acceso controlado y vías rápidas	Alta	60<V<80	Importante	500<T<1000
M3	Vías principales y ejes viales	Media	30<V<60	Media	250<T<500
M4	Vías primarias o colectoras	Reducida	V<30	Reducida	100<T<250
M5	Vías secundarias	Muy reducida	Al paso	Muy Reducida	T<100

Para las clases de vía M1 y M2, las mediciones se realizarán de acuerdo al numeral 540.2.2 “Malla de medición” en donde los puntos de cálculo, se deben espaciar uniformemente en el campo de cálculo, y la cantidad debe seleccionarse de la siguiente manera (Figura 1). En dirección longitudinal el espaciamiento se determina a partir de la ecuación (1).

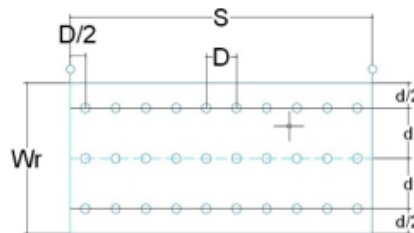


Figura 19. Malla de medición para Iluminancia y luminancia [4]

$$D = \frac{(S)}{N} \quad (1)$$

Donde:

D es el espaciamiento entre los puntos en la dirección longitudinal (m.)

S es el espaciamiento entre luminarias (m.)

N es el número de puntos de cálculo en dirección longitudinal, con los siguientes valores:

Para $S \leq 30$ m. $N = 10$

Para $S \geq 30$ m. el entero que resulte de la relación $N = S/3$

Debe tenerse en cuenta que la primera fila de puntos se localiza a una distancia igual a $D/2$ más allá de primera luminaria. En dirección transversal se toman tres puntos considerando el ancho total de la calzada (ecuación (2)).

$$d = \frac{(Wr)}{3} \quad (2)$$

Dónde:

d es el espaciamiento entre los puntos en la dirección transversal (m.)

Wr es el ancho de la calzada del área aplicable (m).

Para las vías de la malla vial Intermedia y de la malla vial Local se recomienda utilizar el sistema de los 9 Puntos.

2.1 Método Europeo de los 9 puntos

Para este método, es necesario ubicar cada uno de estos puntos de cálculo sobre la porción típica de la vía considerada, definiendo un rectángulo de área largo $(s/2)$ por ancho (w) . De este modo, tal rectángulo se divide en cuatro partes,

dos longitudinales y dos transversales, de modo que los puntos a considerar son cada uno de los vértices de los nuevos rectángulos generados. Así se obtienen los 9 puntos considerados en el método (Figura 2).

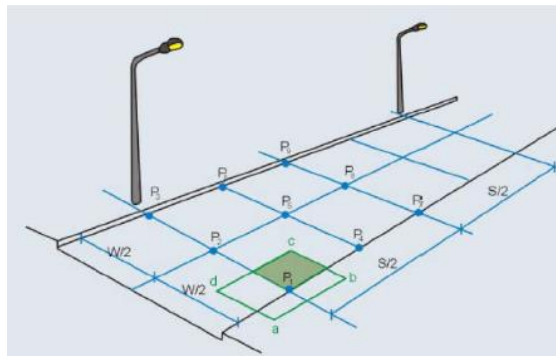


Figura 20. Cálculo de la iluminación promedio método europeo de los 9 puntos [4]

A partir de la lectura en los 9 puntos, la iluminación promedio sobre la vía se calcula con la ecuación (3).

$$E_{prom} = \frac{1}{16} [(E_1 + E_3 + E_7 + E_9) + 2 * (E_2 + E_4 + E_6 + E_8) + 4 * (E_5)] \quad (3)$$

Siendo E1, E2...E9 las luminancias en los puntos P1, P2...P9 respectivamente

3. RESULTADOS

Las avenidas a las que se realizaron las mediciones fueron (Figura 3):

1. Cll. 25 entre Cra. 1 a 7.
2. Cra. 19 entre Cll. 25 a 35.
3. Cll. 15 entre Cra. 44 a Cll. 37.
4. Cll. 15 entre Dg. 18 a 19.

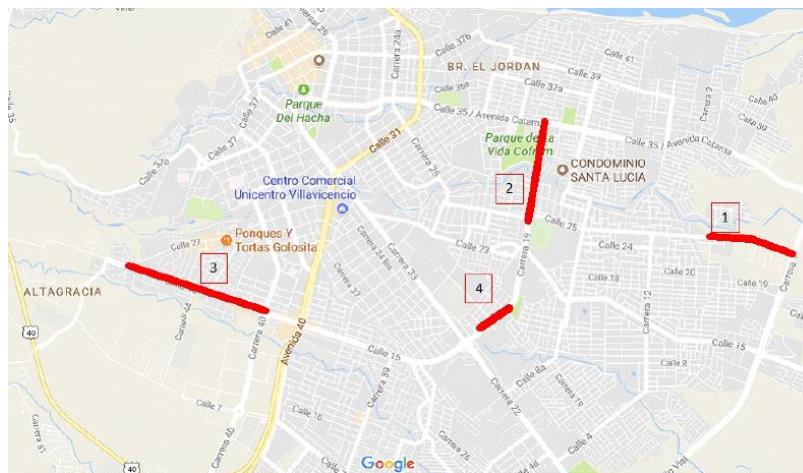


Figura 21. Plano Villavicencio ubicando las vías de estudio

De acuerdo con la Tabla 2, para esos tres tramos de vías la clase de iluminación es:

Tabla 19. Clasificación de las vías que se van a estudiar

Tramo de vía	Iluminación
Cl 25 entre 1-7	M3
Cra 19 entre 25-35	M3
Cl 15 entre 44-37	M3
Cl 15 entre Dg 18-19	M3

De acuerdo con la Tabla 2, se realiza la toma de datos los cuales arrojaron los resultados que se muestran en los Anexos. Para la toma de datos en campo, se contó con un luxómetro y un distanciometro laser. Lo primero que se hizo, fue medir las distancias entre postes metálicos, la altura de los postes, distancia del avance la luminaria, etc. Luego de conocer la interdistancia entre postes metálicos, se toman las medidas con el luxómetro ubicado en el piso, usando el método de los 9 puntos, indicado anteriormente. Estos datos fueron registrados en el formato indicado en la Tabla 3 y en la Figura 4 se muestra el proceso.

Tabla 20. Formato de planilla para los datos de iluminancia medidos en alumbrado público [4]

Medida de niveles de iluminancia-método de los nueve puntos							
Responsable:				Fecha		Hora Inicio	
Dirección del sitio de medición							
Tramo de vía que tiene condiciones uniformes al sitio de la medida							
Luxómetro (marca-referencia-n° serie)							
Condiciones atmosféricas de la noche							
Luminaria (tipo-referencia-marca)				Bombilla (potencia-fuente)			
Tipo de apoyo (poste-longitud)				Avance de la luminaria sobre la calzada-a2(m)			
Ancho de calzada-w(m)				Altura de montaje de la luminaria-h (m)			
Separador	SI	NO	Separadores				
Disposición de las luminarias				Tensión nominal de la luminaria			
Interdistancia entre luminarias consecutivas -s (m)				Distancia del poste al borde de la calzada-a1			
Ángulo de inclinación de la luminaria				Tensión media en la red			
¿El conjunto óptico de las luminarias está sucio por la polución?							
Puntos	1	4	7		Observaciones		
1							
2							



Figura 4. Registro del proceso de medición

3.1 Datos tomados

A partir de los datos tomados y registrados en el ANEXO de este documento, se evidencia que los niveles de iluminación (Tabla 4) están por debajo de los niveles exigidos por el Retilap (Tabla 5).

Tabla 21. Resultado de los niveles de iluminación

Tramos	Medida 1 [lx]	Medida 2 [lx]
Cil 25	13.1	19.2
Frente a Cofrem	15.2	15.1
Cra 19	16.7	3.4
Cil 15	16.3	11.8
Frente a Coca-cola	36.2	28.3

Tabla 22. Valores mínimos mantenidos de iluminancia promedio (lx) en vías motorizadas [4]

Iluminación	Valor promedio (mínimo mantenido) de iluminancia según superficie de la vía (Luxes)			Uniformidad de la Iluminancia E_{min}/E_{prom} (%)
	R1	R2 Y R3	R4	
M3	12	17	15	34%
M4	8	12	10	25%
M5	6	9	8	18%

3.2 Medición de armónicos en una luminaria led

Los armónicos no se producen normalmente por un sistema eléctrico de potencia, pero si en la mayoría de los casos por las cargas conectadas al mismo. Algunas de las fuentes más comunes de armónicos son: los convertidores estáticos, los transformadores sobre-excitados, el alumbrado fluorescente y los dispositivos de estado sólido [1].

- *Distorsión Armónica Total* (THD). Existen varias mediciones comúnmente usadas para indicar el contenido de armónicos en una onda. Uno de los más comunes es la "Distorsión Armónica Total" (THD) que se puede calcular para voltaje o corriente con la ecuación (4).

$$THD = \frac{\sum_{h=2}^{k_{max}} V_h^2}{V_1} \quad (4)$$

V_1 = Valor eficaz de la componente armónica h del V voltaje (o corriente) [1].

- *Fuentes armónicas y sus efectos.* Los armónicos son corrientes y voltajes senoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la línea eléctrica (60 Hz), que distorsionan la forma de onda del voltaje y la corriente de algunos pocos a muchos ciclos. Cada armónico se expresa en términos de su orden, por ejemplo, los armónicos de segundo, tercer y cuarto orden, tienen frecuencias de 120, 180 y 240 Hz respectivamente. Conforme se incrementa el orden, la frecuencia de los armónicos y su magnitud disminuye, por eso, los armónicos de orden inferior, usualmente quinto y séptimo, tienen el mayor efecto en el sistema de potencia. El efecto de un armónico determinado en el sistema de potencia se puede ver sobreponiendo la forma de onda del armónico sobre la forma de onda de la fundamental, para obtener una forma de onda compuesta [1].

Existe un gran número de dispositivos que producen distorsiones armónicas, y más ahora con el uso de cargas no-lineales, esto debido al progreso tecnológico que ha traído consigo una contaminación grave del medio (en este caso, eléctrico) [1]. Las fuentes principales que producen estos disturbios en la red de energía eléctrica son:

- Fuentes armónicas tradicionales (Transformadores, maquinas rotatorias, Hornos de arco y lámparas fluorescentes).
- Fuentes nuevas de armónicos (Inversores y rectificadores con control de ángulo de fase).
- Fuentes futuras de armónicos (Autos eléctricos, conversiones de grandes volúmenes de energía producidas por fuentes no convencionales (Eólica, solar, etc.), uso de ciclo-convertidores para operación de máquinas de baja velocidad y alto par, y el uso de dispositivos de conversión directa de energía como baterías de almacenamiento y celdas de combustible) [1].
- *Lámparas Fluorescentes.* La utilización en gran escala de las lámparas fluorescentes como un medio para reducir el consumo de energía, se ha visto recientemente incrementada en muchos lugares del mundo. Aunque las nuevas tecnologías constituyen uno de los sistemas más eficientes de iluminación, es importante analizar el lado negativo del uso masivo de estas lámparas. La preocupación reside en el deterioro que puede sufrir la calidad de la energía en las instalaciones eléctricas donde se aplica este tipo de alumbrado, por la generación de corrientes armónicas, y que estas puedan fluir a través de los conductores hacia los transformadores en el sistema de distribución [1].
- *Impacto sobre los transformadores.* Un transformador en el que la corriente de distorsión exceda el 5 %, es un candidato a ser degradado por el efecto de armónicos. La distorsión armónica en los transformadores contribuye en forma significativa al calentamiento de estos. Existen tres efectos que resultan de incrementar el calentamiento en los transformadores, cuando la corriente de la carga incluye componentes armónicas: 1) Incremento en las pérdidas en los conductores (RI²), 2) Pérdidas por corrientes circulantes, y 3) Pérdidas en el núcleo. [1].
- *Medición de luminaria led.* Con el fin de medir los armónicos que puede generar una luminaria led de alumbrado público, se compró una luminaria de 50W, marca New Ligh Special, 6500k con ip 65, IRC 70, el cual se utiliza con el registrador 1736, marca Fluke, conectado a la entrada de la luminaria como se muestra en Figura 5. Se programa el Fluke para que realice la medición por espacio de 15 min y como se puede observar, la onda senoidal se ve afectada por 1.3 % y 1.5 % THDv (Figuras 6, 7 y 8).



Figura 5. Foto del montaje para las mediciones THD de la luminaria led

Cabe indicar que estas mediciones se hicieron un sábado en la mañana, cuando no hay clase ni cargas conectadas en el laboratorio que puedan alterar las mediciones. Como se puede observar, el voltaje de la luminaria varía de 119.2 V a 120 V, rango aceptado ya que la diferencia es de apenas 1 V, y el THDv varía de 1.3 A 1.5 %. Al superponer las dos (2) gráficas (V vs THDv), se observa que mientras el voltaje esta 1 V por debajo del nominal, el THDv está en 1.5 %, pero cuando el voltaje sube al nominal, el THDv baja a 1.3 %, es decir, el voltaje y el THDv se comportan inversamente proporcional.

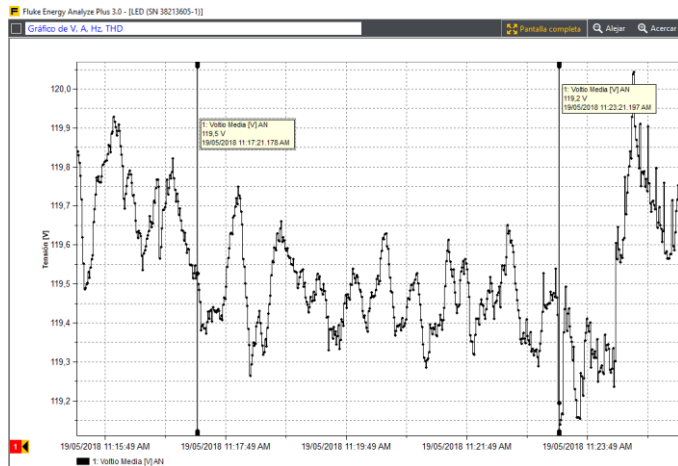


Figura 6. Medición del voltaje de la luminaria led

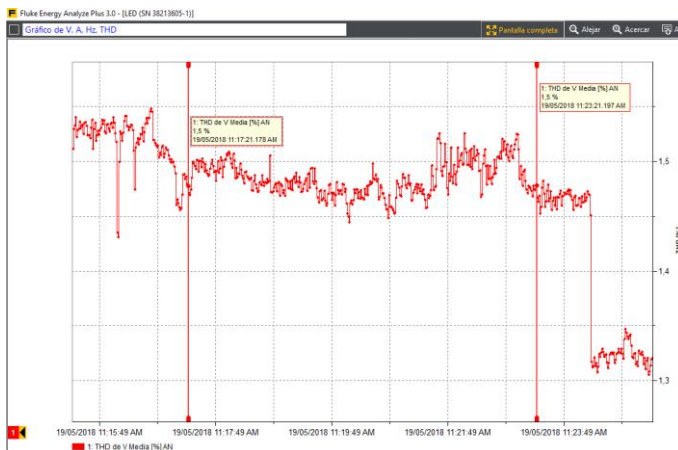


Figura 7. Medición del THD de la luminaria led

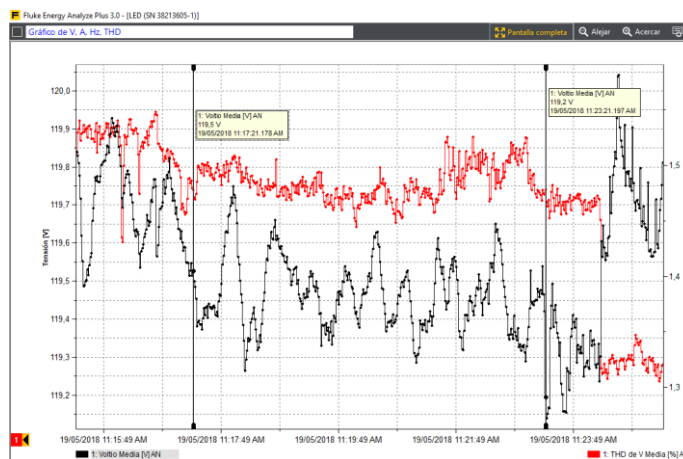


Figura 8. Medición del voltaje y THD de la luminaria led

3.3 Estudio de caso para el análisis de armónicos en sistemas de distribución

Con el fin de poder analizar las posibles causas que han dañado los transformadores en el departamento del Meta, y detectar si una de esas causas fuera por armónicos en la red, se le solicitó la información al operador de red (EMSA), el cual suministró la información solo del año 2012 (Tabla 6), de los transformadores que han reemplazado por diversas fallas. De las posibles fallas que tuvieron los transformadores de la EMSA, se encontró, que la descarga atmosférica es la causa que más daña los transformadores (61,25 %), seguido de Corto de Baja Tensión (21,25 %), Otros Eventos (14,75 %), sobrecarga (1,5 %), y transformador quemado (1,25 %). Se requeriría mayor información por parte de la EMSA (que no fue posible obtener), para poder saber si los cortos de baja tensión, o a lo que ellos llaman “Otros Eventos”, o las sobrecargas, se debió a posibles armónicos en los transformadores, debido a la incidencia de luminarias, lo que sí se puede saber, es que las fallas se produjeron en los transformadores públicos de la EMSA, y que al momento de la falla los transformadores, en su mayoría, contaban con las protecciones y DPS.

Tabla 23. Datos suministrados por la Emsa

Conse Cutivo	Num_ Clientes	Code_ Transfor	Kva	Fases	Marca	Serie	Fecha	Fdespacho	Finstalado	Diassin _serv	Causa	Protecciones
320	4	R1T411	15	1	ELK	10419	02/01/2012 00:00:00	03/01/2012 00:00:00	06/01/2012 00:00:00	4	Descarga Atmosférica	2 DESCARGADORES
321	15	G3T245	15	1	SIE	186859	02/01/2012 00:00:00	03/01/2012 00:00:00	05/01/2012 00:00:00	3	Corto Baja Tensión,	2 DESCARGADORES
322	3	M3T30	10	1	SIE	259532	10/01/2012 00:00:00	10/01/2012 00:00:00	11/01/2012 00:00:00	1	Descarga Atmosférica	OK
323	2	VHT119	10	1	ABB	333538	10/01/2012 00:00:00	11/01/2012 00:00:00	12/01/2012 00:00:00	2	Corto Baja Tensión,	OK
324	12	PGT86	75	3	SIE	227539	12/01/2012 00:00:00	12/01/2012 00:00:00	13/01/2012 00:00:00	1	Otros Eventos	FALTA CAÑUELA
325	3	C8T96	10	1	SIE	63575	12/01/2012 00:00:00	13/01/2012 00:00:00	14/01/2012 00:00:00	2	Corto Baja Tensión,	2 CORTACIRCUITOS 1 DESCARGADOR
326	6	L1T71	15	1	SIE	220239	15/01/2012 00:00:00	16/01/2012 00:00:00	17/01/2012 00:00:00	2	Corto Baja Tensión,	1 DESCARGADOR, SIN TIERRAS
327	6	SMT1	15	1	ABB	153731	16/01/2012 00:00:00	16/01/2012 00:00:00	16/01/2012 00:00:00	0	Corto Baja Tensión,	2 DESCARGADORES 2 CORTACIRCUITOS
328	7	VIT1616	25	1	TSL	28196	17/01/2012 00:00:00	17/01/2012 00:00:00	17/01/2012 00:00:00	0	Descarga Atmosférica	2 DESCARGADORES 1 CORTACIRCUITOS
329	95	MBT5	45	3	SIE	170409	19/01/2012 00:00:00	20/01/2012 00:00:00	21/01/2012 00:00:00	2	Otros Eventos COLUMNA DAÑADA	1 DESCARGADOR
330	2	M3T8046	15	1	SIE	191434	20/01/2012 00:00:00	24/01/2012 00:00:00	26/01/2012 00:00:00	6	Corto Baja Tensión,	1 CORTACIRCUITOS, 2 DESCARGADORES
331	117	VIT996	113	3	ELK	60013	23/01/2012 00:00:00	23/01/2012 00:00:00	23/01/2012 00:00:00	0	Otros Eventos - CORTO EN MT	OK
332	74	VIT1527	45	3	ABB	113000	24/01/2012 00:00:00	24/01/2012 00:00:00	24/01/2012 00:00:00	0	Corto Baja Tensión,	OK
333	7	SMT1	15	1	SIE	032160	24/01/2012 00:00:00	25/01/2012 00:00:00	25/01/2012 00:00:00	1	Otros Eventos	OK
334	8	G3T236	15	1	ABB	1381037	26/01/2012 00:00:00	27/01/2012 00:00:00	28/01/2012 00:00:00	2	Corto Baja Tensión,	2 CORTACIRCUITOS
335	56	PGT60	75	3	TSL	025793	26/01/2012 00:00:00	27/01/2012 00:00:00	28/01/2012 00:00:00	2	Otros Eventos - COLUMNA QUEMADA	OK
336	100	P5T6	75	3	SIN	SIN	27/01/2012 00:00:00	27/01/2012 00:00:00	27/01/2012 00:00:00	0	Corto Baja Tensión,	2 DESCARGADORES 1 CORTACIRCUITOS
337	134	VIT2213	100	3	FBM	2251130	29/01/2012 00:00:00	29/01/2012 00:00:00	29/01/2012 00:00:00	0	Otros Eventos COLUMNA DAÑADA	TIERRAS
338	4	L1T164	10	1	MAG	181962	31/01/2012 00:00:00	01/02/2012 00:00:00	03/02/2012 00:00:00	3	Descarga Atmosférica	OK
339	22	PET1054	75	3	AND	29393	01/02/2012 00:00:00	01/02/2012 00:00:00	03/02/2012 00:00:00	2	Otros Eventos COLUMNA DAÑADA	2 DESCARGADORES 2 CORTACIRCUITOS
340	10	A1T135	25	1	ABB	12055	01/02/2012 00:00:00	01/02/2012 00:00:00	02/02/2012 00:00:00	1	Descarga Atmosférica	2 DESCARGADORES 2 CORTACIRCUITOS
341	5	D1T6907	15	1	TCE	260687	06/02/2012 00:00:00	07/02/2012 00:00:00	10/02/2012 00:00:00	4	Corto Baja Tensión,	OK
342	70	P3T6	50	3	SIE	381224	06/02/2012 00:00:00	07/02/2012 00:00:00	07/02/2012 00:00:00	1	Otros Eventos COLUMNA DAÑADA	OK
343	8	R1T416	15	1	ABB	138664	06/02/2012 00:00:00	07/02/2012 00:00:00	07/02/2012 00:00:00	1	Descarga Atmosférica	2 CORTACIRCUITOS
344	7	R1T116	10	1	ABB	197341	07/02/2012 00:00:00	07/02/2012 00:00:00	08/02/2012 00:00:00	1	Corto Baja Tensión,	2 CORTACIRCUITOS
345	9	L1T36	15	1	MAG	74630	07/02/2012 00:00:00	08/02/2012 00:00:00	11/02/2012 00:00:00	4	Descarga Atmosférica	1 CORTACIRCUITO
346	33	GRT199	30	3	SIE	1840595	07/02/2012 00:00:00	08/02/2012 00:00:00	08/02/2012 00:00:00	1	Descarga Atmosférica	OK
347	70	PLT119	75	3	AND	19267	07/02/2012 00:00:00	08/02/2012 00:00:00	08/02/2012 00:00:00	1	Corto Baja Tensión,	OK
348	119	VIT192	113	3	WTN	81783	09/02/2012 00:00:00	09/02/2012 00:00:00	09/02/2012 00:00:00	0	Otros Eventos TRAFÓ BOTANDO ACEITE	OK
349	30	GRT199	30	3	SIE	231848	09/02/2012 00:00:00	10/02/2012 00:00:00	10/02/2012 00:00:00	1	Corto Baja Tensión,	OK
350	5	G4T134	10	1	MAG	144587	10/02/2012 00:00:00	13/02/2012 00:00:00	13/02/2012 00:00:00	3	Descarga Atmosférica	2 CORTACIRCUITO 1 DESCARGADOR
351	8	APT458	15	3	SIE	322588	12/02/2012 00:00:00	12/02/2012 00:00:00	12/02/2012 00:00:00	0	Corto Baja Tensión,	1 DESCARGADOR
352	4	VHT117	15	1	TSL	50104	12/02/2012 00:00:00	13/02/2012 00:00:00	15/02/2012 00:00:00	3	Descarga Atmosférica	OK
353	18	PGT152	30	3	ABB	134885	15/02/2012 00:00:00	16/02/2012 00:00:00	16/02/2012 00:00:00	1	Corto Baja Tensión,	OK
354	3	P2T9040	10	1	ABB	331063	17/02/2012 00:00:00	17/02/2012 00:00:00	18/02/2012 00:00:00	1	Descarga Atmosférica	1 DESCARGADOR
355	15	GRT570	30	3	FBM	8511963	18/02/2012 00:00:00	20/02/2012 00:00:00	20/02/2012 00:00:00	2	Corto Baja Tensión,	OK
356	65	PET1	30	3	TSL	24793	19/02/2012 00:00:00	20/02/2012 00:00:00	20/02/2012 00:00:00	1	Corto Baja Tensión,	1 CORTACIRCUITOS
357	4	C5T9958	10	3	SIE	23279	20/02/2012 00:00:00	21/02/2012 00:00:00	21/02/2012 00:00:00	1	Corto Baja Tensión,	OK

3.3.1 Alternativas de luminarias

Para la selección de las alternativas de las luminarias se deben analizar las tecnologías con base en unos parámetros mínimos que deben tener, técnicamente hablando (Tabla 7).

Tabla 7. Tabla de requisitos para el análisis técnico

Componente	Indicador	Condición Mínima Requerida
Lámpara	Eficacia	Igual o mayor que 80
Equipo	(Lúmenes/watt)	
Eléctrico	Pérdidas Máximas(Watts)	Según Potencia
Luminaria	Rendimiento (%)	Igual o mayor que 70
	Grado IP y lluvia	Óptica IP 54, cuerpo IP 53

Estos parámetros, los cumple la mayoría de las luminarias que existen en el país, ya que para tener el certificado del producto y tener la autorización de ser comercializadas en Colombia, se requiere con cumplir con unos parámetros mínimos, entre los que están estos. Para la licitación o cambio de tecnología en Alumbrado público, no solo se debe de tener en cuenta la parte técnica, sino también el análisis económico, en donde se considera, un análisis costo-beneficio, y un análisis de costo- eficiencia, que es donde se ve cuánto vale la inversión inicial, y en cuanto tiempo se va a recuperar la inversión, incluyendo los costos de mantenimientos y operación del sistema de alumbrado público.

3.3.2 Simulación de estudio de caso

Con el fin de comprobar los niveles de iluminación en uno de los escenarios donde se tomaron las medidas, se simulará el perfil de vía frente a Cofrem, bajo los mismos parámetros del sitio, y con 3 diferentes tipos de luminarias. Para realizar la simulación, se recurrirá al software de iluminación gratis, Dialux Evo, el cual es certificado para los estudios fotométricos, ante el Retilap (Figura 9). A continuación, se presentan los parámetros de las vías para los 3 perfiles de vías en donde se tomaron las medidas (Tabla 8).

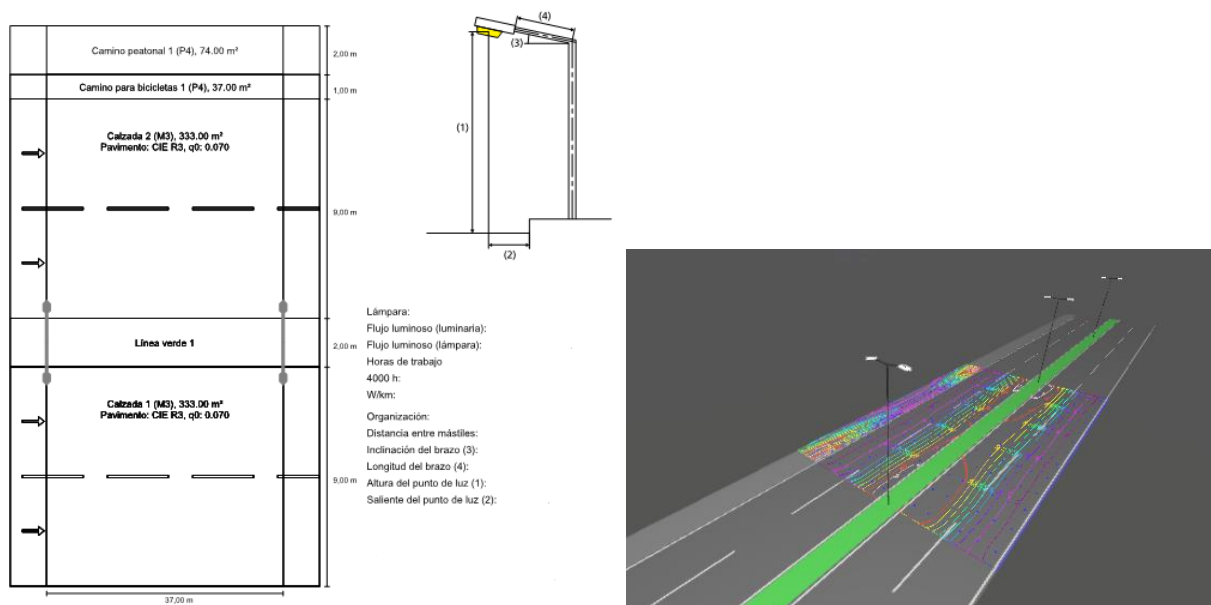


Figura 9.22 Esquema de estudio fotométrico

Tabla 8. Parámetros de entrada para el sistema de iluminación

PARÁMETROS	Unidad		
	Frente a Cofrem	Calle 25 entre cra 1 a 7	Carrera 19 entre calle 25 a 35
Ancho de vía	9 m	7,1 m	8,5 m
Separador	2 m	N/A	1,5 m
Ancho Ciclovía	1 m	N/A	1 m
Ancho peatonal	2 m	2 m	1,5 m
Velocidad de diseño	50 km/h	50 km/h	50 km/h
Tipo de vía	M3	M3	M3
Recubrimiento	R3	R3	R3
Configuración luminarias	Doble en separador central	Lateral	Bilateral opuesta
Interdistancia entre luminarias	37 m	35 m	35 m
Altura de los mástiles	12 m	9 m	12 m
Altura de montaje	12,7 m	11 m	12,7 m
Ángulo de inclinación de luminaria	0°	0°	0°

Se simuló con 3 tipos de luminarias diferentes y con diferentes potencias (ya que se desconoce la potencia y el tipo de luminaria instalada en esos tramos), arrojando los resultados de la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados simulación

Frente a Cofrem (Cra 19 entre 25-35)			
	Sylvania	Roy Alpha	Philips
Luminaria	LED STREET LIGHT URBAN	RALED	1xSON-PP250W MR
Tecnología	LED	LED	Na
Potencia (W)	150	143	250
Lúmenes (lm)	21000	17800	31100
Eficiencia (lm/W)	140	124.5	112
Resultados			
Vía			
Calzada 1			
Luminancia (cd/m ²)	1,93	1,28	1,38
Uniformidad general (U ₀)	0,45	0,51	0,48
Uniformidad longitudinal (U _L)	0,89	0,8	0,8
TI [%]	14	9	10
Calzada 2			
Luminancia (cd/m ²)	1,91	1,30	1,38
Uniformidad general (U ₀)	0,45	0,52	0,48
Uniformidad longitudinal (U _L)	0,89	0,83	0,8
TI [%]	14	9	10
Peatonal (P2)			
Iluminancia (E)	13,7	12,36	12
Bicicletas (P2)			
Iluminancia (E)	16,18	14,35	14,47

Como se observa y de acuerdo con la Tabla 10, para esos tipos de luminarias con esas potencias, cumplen con los niveles de iluminación para el tipo de vía M3.

Tabla 10. Requisitos fotométricos mantenidos por clase de iluminación para tráfico motorizado con base en la luminancia de la calzada [4]

Iluminación	Zona de aplicación				
	Todas las vías		Vías sin o con pocas intersecciones		Vías con calzadas peatonales no iluminadas
	Luminancia promedio L _{prom} (cd/m ²) Mínimo mantenido	Factor de uniformidad U ₀ Mínimo	Incremento de umbral T _i % Máximo inicial	Factor de uniformidad longitudinal de luminancia U _L Mínimo	Relación de alrededores SR Mínimo
M1	2	0,4	10	0,5	0,5
M2	1,5	0,4	10	0,5	0,5
M3	1,2	0,4	10	0,5	0,5
M4	0,8	0,4	15	N.R	N.R
M5	0,6	0,4	15	N.R	N.R

3.4 Análisis del Costo Anual Uniforme Equivalente CAUE

De acuerdo con el Retilap, el Costo Anual Uniforme Equivalente del proyecto es el mismo valor presente total del proyecto (PT) por el factor de anualidad. El Costo Anual Equivalente se debe considerar para un periodo de evaluación de 30 años, teniendo en cuenta la vida útil de los diferentes componentes del proyecto y un valor de salvamento de cero (0) pesos [4]. El valor presente total del proyecto (PT) se obtiene aplicando la ecuación (5).

$$VPN = PT = CI + VP \text{ (CAO)} \quad (5)$$

Donde:

CI: Costos Iniciales (CI) de la infraestructura (luminarias, transformadores, conductores, postes, materiales, etc.), transporte y mano de obra.

CAO: Costos Anuales de Operación (CAO), los cuales están compuestos por el mantenimiento de la infraestructura y el consumo de energía eléctrica del sistema de alumbrado. Estos costos son anualizados y se deben traer a valor presente, con la ecuación (6).

$$VP(\text{CAO}) = \text{CAO} + \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right) \quad (6)$$

Donde:

i: corresponde a la tasa de descuento (TD), la cual se establece en el 16,06 % (o la que aplique la CREG para la red domiciliaria).

n corresponde al número de año de análisis, que en este caso es de 30 años.

El Valor Total (PT) se multiplica por el factor de anualidad para obtener el CAUE del proyecto (Ecuación (7)).

$$\text{CAUE} = \text{CAO} - V P (V S) + \text{CI} / (1 + i)^n \quad (7)$$

Para este análisis, y con el fin de poder contar con valores aterrizados a los reales, se realizó la solicitud al Concesionario Iluminación Villavicencio, sobre los costos de mantenimiento, costo del cambio de luminarias, costos de luminarias led y tipos de luminarias por las cuales se cambiaron las luminarias de sodio, pero por confidencialidad, no es accesible al público. Se plantea, con fines académicos, evaluar los factores que conforman el CAUE a la hora de reemplazar y cambiar de tecnología de sodio a led. Como la infraestructura ya es existente, es decir, los postes, el cableado y las cajas de halado ya existen para esos perfiles de vías, solo se tendría en cuenta los parámetros técnicos de las luminarias (potencia, eficiencia, vida útil, etc) para el análisis del CAUE. Un factor importante que hay que tener en cuenta, es que cuando se va a realizar el cambio de tecnología sodio a led, la interdistancia entre postes no se podrían cambiar, quitándole la ventaja de algunas luminarias de ser instaladas a mayores interdistancias, y, por lo tanto, tener una menor cantidad de luminarias y posiblemente un menor Costo Inicial (CI).

En la evaluación económica (CAUE) está básicamente formada por los costos iniciales (CI) y los costos operacionales (CAO): La primera, tiene la ventaja de que los costos en la tecnología led, hoy en día, no son tan costosos como hace unos años, incluso llegan a competir con los precios de la tecnología sodio, que poco a poco van saliendo del mercado; La componente CAO, incluye el consumo de energía, que le da una gran ventaja a la tecnología led, que son los que tienen menor consumo comparada con las de sodio. Este valor tiende a ser considerable, debido a que se debe de multiplicar el consumo de las luminarias, por 12 horas que duran encendidas, por el precio del kWh y por los 365 días del año. Otro factor importante que influyen en el CAO, es la vida útil de las luminarias, que, por lo general, para las luminarias led, es de 100.000 horas, es decir, que, en promedio, cada 100.000 h (23 años), se debería de realizar el cambio de luminaria. En conclusión, se podría decir que las luminarias de alumbrado público hoy en día compiten por ser cada vez más eficiente (es decir, generar más lúmenes por Watios), y tener precios competitivos en el mercado. Estos dos parámetros, serían los factores claves a la hora de seleccionar el tipo de iluminación.

4. CONCLUSIONES

A partir de las visitas hechas a las avenidas seleccionadas, y corroborando con las mediciones hechas de los niveles de iluminación, se observa que uno de los principales problemas que se encuentra con respecto al alumbrado público, es la falta de poda de árboles lo que está generando zonas oscuras e inseguras.

Los niveles de iluminación para la Cra. 19 fueron más bajo a los demás debido principalmente, a que, en este tramo, existen árboles de gran altura lo que genera sombra.

Otro de los posibles problemas que tiene la avenida, es debido a la disposición de las luminarias, es decir, en la carrera 19 las luminarias se encuentran ubicadas en el carril central con doble brazo, en cambio, en la calle 15, las luminarias tienen una distribución bilateral.

En la carrera 19, el nivel de iluminación de un tramo presenta un promedio de 3 lx, lo cual se debe a que la luminaria que ilumina esa zona, se encontraba dañada cuando se hizo el estudio, y las otras luminarias, ubicadas a 37m, se encuentran obstruidas por árboles y no alcanzan a compensar los niveles de iluminación.

Se requiere que la empresa prestadora del Servicio de Alumbrado público, realice el mantenimiento preventivo y correctivo de las luminarias, y realice constantemente la poda de árboles, con el fin de no generar zonas oscuras, que promueven la delincuencia e inseguridad en algunos sectores.

La zona de la calle 15 entre diagonal 18 y 19, se encuentra bien iluminada debido a que antes de la medición, les habían hecho mantenimiento a las luminarias y también a la influencia de las luminarias de las casas aledañas que iluminan las fachadas.

Al superponer las gráficas de Voltaje y Distorsión Armónica (THDv), se observó que el voltaje y el THDv se comportan inversamente proporcional, es decir, mientras uno baja, el otro sube, y viceversa. Aunque los valores de THDv son muy bajos y aceptables por la normatividad, es necesario tener en cuenta que esto fue un estudio de caso con una luminaria led 50W, por lo tanto, en una ciudad donde hay miles de luminarias, la incidencia de todas puede afectar y generar armónicos de gran consideración que puede afectar los transformadores de distribución.

Las luminarias led son más eficientes tanto económica como técnicamente, comparada con las otras tecnologías del mercado actual. Esto se corrobora en las mediciones tomadas en campo, en las simulaciones hechas, y en el análisis económico de los proyectos de iluminación CAUE. Dos parámetros claves a la hora de seleccionar el tipo de alumbrado público es la eficiencia de las luminarias (lm/W) y el costo de las mismas.

REFERENCIAS

- [1] E. Harper. El ABC de la calidad de la Energía Eléctrica. México (México): Limusa, 2018.
- [2] J. Montero G., y J. Gómez M., "Evaluación De Soluciones Energéticas Para Alumbrado público En Villavicencio (Meta)". Tesis de Pregrado, Universidad de la Salle, Bogotá D.C. (Colombia), 2014.
- [3] Ministerio de Minas y Energía, "Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. RETIE", Bogotá D.C. (Colombia). 2013
- [4] Ministerio de Minas y Energía, "Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado público. RETILAP", Bogotá D.C. (Colombia). 2010.
- [5] Wikipedia, "Lámpara Led", 2019. Disponible <https://es.wikipedia.org/wiki/LamparaLED>.

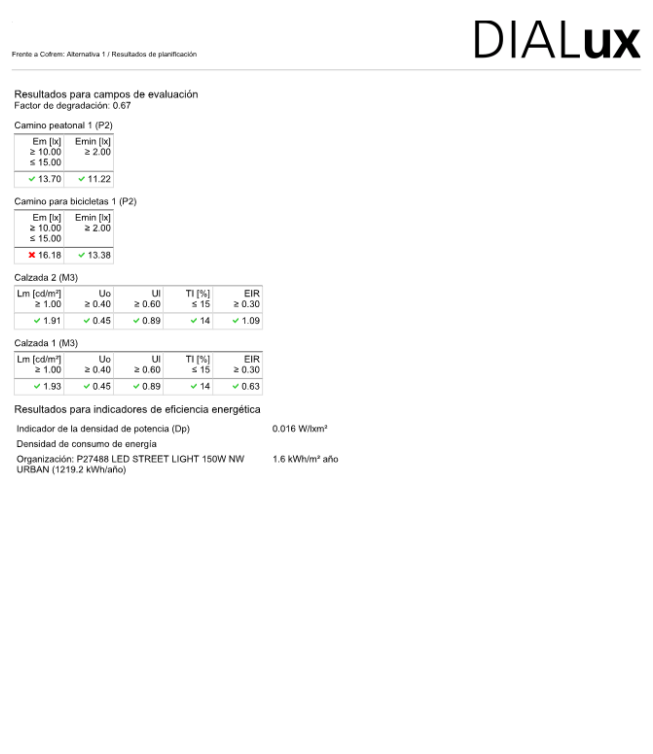
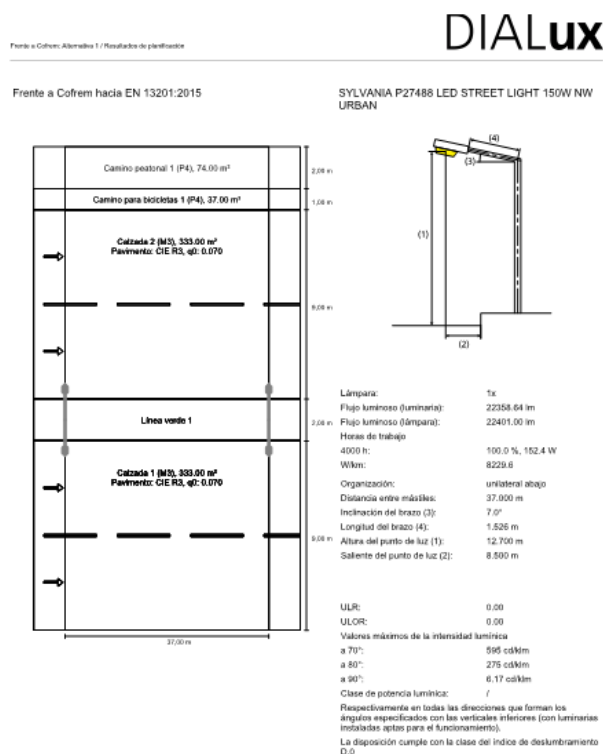
ANEXOS

I. Registro de datos medidos en campo

Calle 25 entre cra 1 a 7				
Puntos	1	4	7	
1	3.1	1.9	23	
2	4	10	30	
3	4.5	18	31	
Tramo de vía frente a la morgue				
Puntos	1	4	7	
1	11	17	28	
2	12	20	28	
3	12	20	23	
Tramo de vía -calle 25 entre cra 2 a 4				
Carrera 19 entre calle 25 a 35				
Puntos	1	4	7	
1	3.55	13	44	
2	8.7	8.5	34	
3	10.78	11.15	17.5	
Tramo de vía frente al parque Cofrem costado norte				
Puntos	1	4	7	
1	2	6	53.8	
2	1	13	34	
3	5	13.2	20	
Tramo de vía frente al parque Cofrem costado sur				
Puntos	1	4	7	
1	13	12	42.6	
2	10	22	9.4	
3	7	26	2.7	
Tramo de vía -cra19 entre calle 25 j y 31				
Puntos	1	4	7	
1	2	2	22	
2	2	3	0.2	
3	3.3	1.3	3.6	
Tramo de vía Cra 19 entre calle 25e y 25 f				
Calle 15 entre cra 44 a calle 37				
Puntos	1	4	7	
1	29.7	4.99	1.3	
2	33.5	12.5	16.7	
3	21.8	16.3	15.7	
Tramo de vía- Calle 15 con cra 44				
Puntos	1	4	7	
1	2	1.9	31.5	
2	2.5	3.8	32.5	
3	9.9	15.7	25.5	
Tramo de vía -calle 15 con diagonal 18				
Puntos	1	4	7	
1	54.5	41.2	24.8	
2	41.5	40	20.6	
3	42.1	36.4	19.6	
Tramo de vía - Calle 15 con diagonal 18				
Puntos	1	4	7	
1	54.5	41.2	24.8	
2	41.5	40	20.6	
3	42.1	36.4	19.6	
Tramo de vía-calle 15 con diagonal 19				

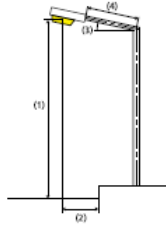
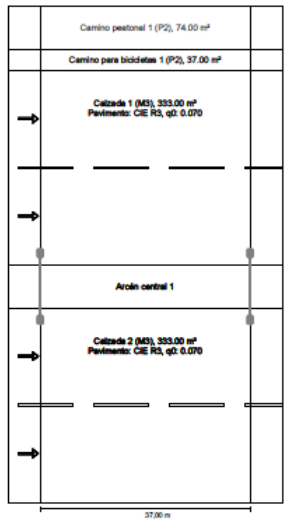
II. Resultado estudio fotométrico frente a Cofrem

Sylvania



Frente a Cotrem hacia EN 13201:2015

Laboratorio de Ensayos ROY ALPHA S.A. N/A
RALED I óp RA02SII 2430-6000



Lámpara: definido por el usuario
Flujo luminoso (luminaria): 1737.31 lm
Flujo luminoso (lámpara): 1760.00 lm
Horas de trabajo: 4000 h
Wlm: 100.0 %, 143.0 W
7722.0
Organización: Arcén central
Distancia entre mástiles: 37.000 m
Inclinación del brazo (3): 5.0°
Longitud del brazo (4): 1.497 m
Altura del punto de luz (1): 12.700 m
Saliente del punto de luz (2): 0.500 m

ULR: 0.00
ULOR: 0.00
Valores máximos de la intensidad luminica sobre 70°: 482 cd/km *
sobre 80°: 127 cd/km *
sobre 90°: 4.45 cd/km *
Clase de potencia luminica: 0/2
Respectivamente en todas las direcciones que forman los ángulos especificados con las verticales inferiores (con luminarias instaladas aptas para el funcionamiento).
* Luminous intensity values in [cd/km] for calculating luminous intensity class refer to the output flux of the luminaire, according EN 13201:2015.
La disposición cumple con la clase del índice de deslumbramiento D 0

Resultados para campos de evaluación
Factor de degradación: 0.67

Camino peatonal 1 (P2)

Em [lx]	Emin [lx]
≥ 10.00	≥ 2.00
≤ 15.00	
✓ 12.36	✓ 9.62

Camino para bicicletas 1 (P2)

Em [lx]	Emin [lx]
≥ 10.00	≥ 2.00
≤ 15.00	
✓ 14.35	✓ 11.02

Calzada 1 (M3)

Lm [cd/m²]	Uo	Ui	Tl [%]	EIR
≥ 1.20	≥ 0.40	≥ 0.50	≤ 10	≥ 6.30
✓ 1.28	✓ 0.51	✓ 0.80	✓ 9	✓ 6.97

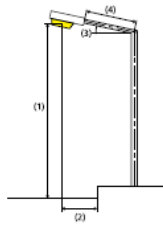
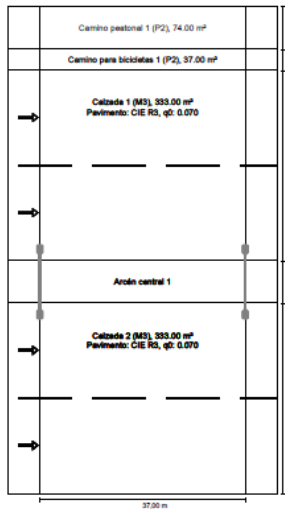
Calzada 2 (M3)

Lm [cd/m²]	Uo	Ui	Tl [%]	EIR
≥ 1.20	≥ 0.40	≥ 0.50	≤ 10	≥ 6.30
✓ 1.30	✓ 0.52	✓ 0.83	✓ 9	✓ 6.70

Resultados para indicadores de eficiencia energética
Indicador de la densidad de potencia (Dp) 0.020 W/m²
Densidad de consumo de energía 1.5 kWh/m² año
Organización: RALED I óp RA02SII 2430-6000 (1144.0 kWh/año)

Frente a Cotrem hacia EN 13201:2015

Philips SGS102 1xSON-PP250W MR



Lámpara: 1xSON-PP250W
Flujo luminoso (luminaria): 21452.31 lm
Flujo luminoso (lámpara): 21100.00 lm
Horas de trabajo: 4000 h
Wlm: 100.0 %, 276.0 W
14904.0
Organización: Arcén central
Distancia entre mástiles: 37.000 m
Inclinación del brazo (3): 5.0°
Longitud del brazo (4): 1.478 m
Altura del punto de luz (1): 12.700 m
Saliente del punto de luz (2): 0.500 m

ULR: 0.00
ULOR: 0.00
Valores máximos de la intensidad luminica sobre 70°: 169 cd/km *
sobre 80°: 55.4 cd/km *
sobre 90°: 20.3 cd/km *
Clase de potencia luminica: 0/2
Respectivamente en todas las direcciones que forman los ángulos especificados con las verticales inferiores (con luminarias instaladas aptas para el funcionamiento).
* Luminous intensity values in [cd/km] for calculating luminous intensity class refer to the output flux of the luminaire, according EN 13201:2015.
La disposición cumple con la clase del índice de deslumbramiento D 3

Resultados para campos de evaluación
Factor de degradación: 0.67

Camino peatonal 1 (P2)

Em [lx]	Emin [lx]
≥ 10.00	≥ 2.00
≤ 15.00	
✓ 12.00	✓ 8.77

Camino para bicicletas 1 (P2)

Em [lx]	Emin [lx]
≥ 10.00	≥ 2.00
≤ 15.00	
✓ 14.47	✓ 10.38

Calzada 1 (M3)

Lm [cd/m²]	Uo	Ui	Tl [%]	EIR
≥ 1.20	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 10	≥ 6.30
✓ 1.38	✓ 0.48	✓ 0.80	✓ 10	✓ 1.09

Calzada 2 (M3)

Lm [cd/m²]	Uo	Ui	Tl [%]	EIR
≥ 1.20	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 10	≥ 6.30
✓ 1.38	✓ 0.48	✓ 0.80	✓ 10	✓ 0.68

Resultados para indicadores de eficiencia energética
Indicador de la densidad de potencia (Dp) 0.031 W/m²
Densidad de consumo de energía 2.8 kWh/m² año
Organización: SGS102 1xSON-PP250W MR (2208.0 kWh/año)

Caracterización y monitoreo de la radiación solar, índice UV y temperatura en el parque metropolitano María Lucía, vereda La Llanerita, Apiay, Villavicencio

Pedro L. Muñoz O.¹

Luís M. Pulido O.²

Jefferson Parra C.³

Corporación Universitaria del Meta – Colombia

La radiación solar, índice UV y la temperatura son variables de interés en el cálculo de sistemas solares fotovoltaicos y térmicos, es por ello importante definir y conocer los conceptos básicos sobre irradianza, irradiación, Hora pico solar y temperatura. Una forma de monitorear y medir estas variables es con el empleo de sensores e instrumentos adecuados, elementos que están integrados en la estación meteorológica, este dispositivo puede ser instalado y programado para realizar de forma automática la medición de las variables seleccionadas y escoger sus unidades. Esta información es necesaria para el diseño y optimización de sistemas de generación que emplean energías alternativas, en el caso particular la estación ha sido instalada en una zona rural vereda la llanerita, Apiay, Villavicencio, Meta que tiene zonas que no están interconectadas a la red eléctrica nacional donde la aplicación de las energías alternativas son una necesidad prioritaria.

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el sol, ella es la fuente básica y primaria responsable de las otras transformaciones energéticas, siendo fundamental en el desarrollo y conservación de la vida, permitiendo la generación de la biomasa y los procesos de fotosíntesis, el calentamiento de las masas de aire para la formación de los vientos. Esta energía es limpia, renovable, de fácil acceso, energía que llega a la tierra en forma de una señal electromagnética en sus tres componentes radiación UV ultravioleta, radiación Infrarroja y radiación de luz visible. Tiene múltiples formas de aprovechamiento dentro de las que se destacan las aplicaciones fotovoltaicas y térmicas.

Para optimizar estas aplicaciones es necesario realizar mediciones de la radiación solar y la temperatura en el sitio, durante un largo periodo de tiempo (preferiblemente un año), que permitan el monitoreo y caracterización de este recurso solar. Pero antes es necesario definir y aclarar algunos conceptos y presentar unidades utilizadas (Tabla 1):

- Radiación solar: Radiación electromagnética emitida por el sol.
- Irradiancia: Potencia incidente por unidad de superficie W/m^2
- Irradiancia = potencia / superficie = Kw/m^2
- Irradiación: Energía incidente por unidad de superficie (en determinado periodo de tiempo) $Kw*h/m^2$
- Irradiación = Potencia * hora/superficie = $Kw*h/m^2$
- Constante solar: Irradiancia recibida por una superficie a una distancia sol-tierra media. Igual a $1353 W/m^2$
- HPS: Una (1) HSP equivale a la energía que se recibe en una hora de irradiación de $1 KW/m^2$, es la cantidad de horas de sol, que inciden sobre la superficie del módulo o panel solar [8].
- Panel solar fotovoltaico: Dispositivo utilizado para convertir la energía lumínica (luz) en energía eléctrica, voltaje DC.
- Panel solar térmico: Colector o dispositivo que es utilizado para convertir la energía solar en calor (foto térmica) que es transferida a un fluido portador del calor.
- Estación meteorológica: Equipo utilizado para medir y monitorear las variables climáticas como pluviosidad (lluvia), temperatura, presión atmosférica, humedad, velocidad y dirección del viento, radiación solar y UV.

Tabla 1. Unidades utilizadas para la determinación del recurso solar

Unidad	Equivalencia (SI)
MJ/m^2	$1 \times 10^6 J/m^2$
kWh/m^2	$3.6 \times 10^6 J/m^2$
Btu/ft^2	$11.356 \times 10^3 J/m^2$
Langley = $1 cal/cm^2$	$2.4 \times 10^{-5} J/m^2$

En esta primera fase de los proyectos de investigación en energías renovables, la Corporación Universitaria del Meta adquiere una estación meteorológica, Marca Davis Vantage Pro2 modelo 6162 (Figura 1), equipo utilizado en el monitoreo y medición de las variables climáticas. Para la medición de la temperatura la estación cuenta con un termómetro y con un sensor de radiación solar o piranómetro (Figura 2) que está basado en un fotodiodo de silicio que detecta radiaciones en el rango de 300 a 1100 nanómetros de longitud de onda, otro sensor para la radiación ultravioleta que trabaja en el rango de 290 a 390 nanómetros de longitud de onda.

¹ plochoa@gmail.com; pedro.munoz@unimeta.edu.co

² luis.pulido@unimeta.edu.co

³ jefferson.parra@unimeta.edu.co



Figura 1. Estación meteorológica Davis 6162

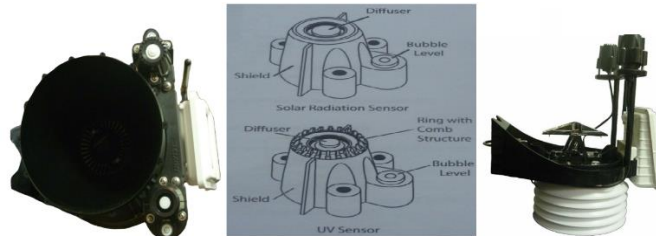


Figura 2. Sensores de radiación solar y UV, Catalogo sensor de radiación solar y UV de estación, sensor temperatura, humedad termo higrómetro [4]

Estos sensores cuentan con una cubierta de teflón que protege al sensor de la lluvia y la humedad, así como indicadores de nivel para que los sensores de radiación y el balancín del pluviómetro este alineado, en forma perpendicular a la lluvia y los rayos solares. El sensor de temperatura o termo higrómetro está ubicado en la parte inferior debajo del balancín del pluviómetro rodeado de las rejillas de ventilación. La institución cuenta con un terreno de aproximadamente 120 hectáreas, conocido como Parque Metropolitano María Lucía PMML (Figura 3), ubicado en la vereda la llanerita Apiay, a una distancia de 14 a 15 kilómetros de casco urbano de Villavicencio Meta, en este sitio la institución desarrolla diferentes proyectos de investigación de los programas de ingeniería, y específicamente con los programas de ingeniería eléctrica, electrónica y sistemas, se desarrollan proyectos para incentivar la investigación entre alumnos y profesores, una línea de desarrollo es en energías alternativas.

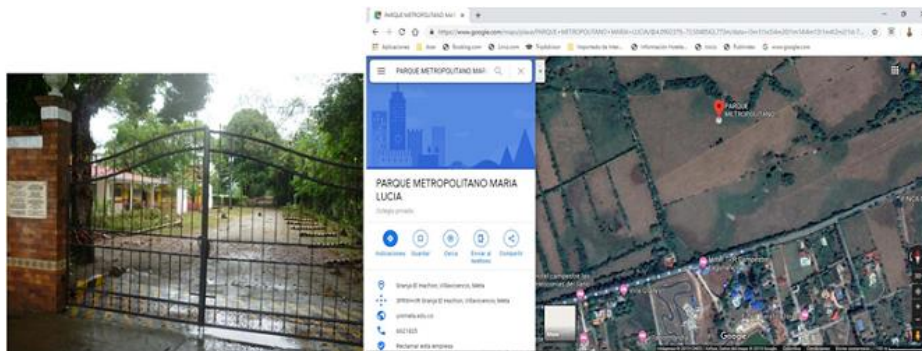


Figura 3. Entrada al Parque Metropolitano María Lucía, vereda la llanerita. Apiay, Villavicencio, Meta

Varios de los proyectos giran en torno al desarrollo de las energías renovables y la sostenibilidad, uno de estos proyectos es la Caracterización y monitoreo de las variables climáticas en el Parque Metropolitano María Lucía.

En la primera fase se desarrolla el estudio específicamente de la radiación solar, niveles UV y temperatura para aplicaciones fotovoltaicas o térmicas, planteándose un objetivo principal y unos específicos. El objetivo principal es monitorear y caracterizar la radiación solar, UV y temperatura en el Parque Metropolitano María Lucía. Los objetivos específicos son:

- Instalar la estación meteorológica en el Parque Metropolitano María Lucía.
- Medir los parámetros de radiación solar, UV ultravioleta y temperatura.
- Recopilar la información o datos de la estación para realizar análisis estadístico y comparación con datos del atlas de radiación solar de Colombia.

Es innegable la necesidad de diversificar la matriz energética del país y generar energía de forma descentralizada para que un mayor número de personas, tengan acceso a los beneficios de la electricidad y un desarrollo sostenible, en especial en aquellas zonas no interconectadas. Como se puede observar en la Figura 4 del mapa de Colombia, indica que en algunos departamentos la interconexión eléctrica es apenas del 60% y que muchos municipios cerca de 1.710 poblados no cuentan con el servicio de energía eléctrica, tal es el caso del departamento del Meta y otras zonas del

país, que por razones de naturaleza económica o técnica cuentan de forma parcial y no constante de los beneficios de la electricidad, que un servicio fundamental según la constitución.

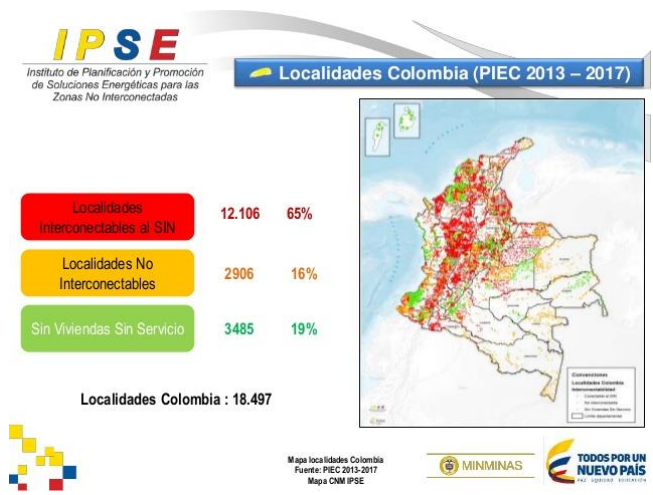


Figura 4. Zonas interconectadas y No interconectadas de Colombia [9]

Por estas y muchas otras razones el gobierno nacional impulsa el desarrollo de las energías alternativas, la institución o academia no ajena a esta problemática desarrolla proyectos relacionados con el tema en beneficio de las comunidades sociales y rurales de la zona. La institución realiza la inversión de la compra de una estación meteorológica, y otros equipos para el desarrollo de diversos proyectos de investigación, que sean amigables con el medio ambiente y permitan un desarrollo sostenible. Acorde con los programas de las naciones unidas para el desarrollo sostenible, programas de la unidad de planeación minero energética UPME y políticas estatales.

2. MÉTODO

La metodología básica es primero conocer el funcionamiento de la estación, proceder a su instalación y llevar a cabo pruebas de funcionamiento, la medición de las variables deseadas posteriormente realizar la descarga de la información y análisis de datos mediante el programa WeatherLink y Excel. La estación meteorológica es instalada en el parque metropolitano a finales del mes de octubre del año 2018, a partir de este momento se analiza el sitio más adecuado para la ubicación e instalación de la estación meteorológica, así como recibir la información de los catálogos, manuales y capacitación en el uso y mantenimiento de la misma. Se procede a realizar la instalación de la estación sobre un mástil paralelo a la torre de un molino de viento a una altura de 8 metros (Figura 5), donde se desarrollan las mediciones de prueba y verificación del funcionamiento de la estación. La estación cuenta con un software Weatherlink versión 6.0.4. El cual permite la programación para la toma de datos de forma automática conectando el sistema a un computador portátil o de forma manual a través de una consola de control.



Figura 5. Ubicación de la estación Meteorológica Unimeta

La estación cuenta con una consola o unidad controladora que recibe los datos vía comunicación inalámbrica, de señal de Radiofrecuencia en un rango de frecuencia de transmisión y recepción de 902 a 928 MHZ, donde la distancia de separación entre el controlador y la estación es de máximo 300 metros línea de vista [3], aunque esta distancia se puede ampliar con unidades repetidoras, en la pantalla del controlador se pueden visualizar las diferentes variables climáticas, mediante un teclado es posible realizar la programación en forma manual de los parámetros, unidades de medición y otras características de la estación. La misma cuenta con un sistema de alimentación o adaptador de conexión a 120 voltios AC que reduce el voltaje de trabajo de 5 VDC, 300mA, y alimentación con baterías en ausencia de suministro eléctrico, así como sistema de respaldo de energía para evitar la pérdida de datos o información por cierto periodo de tiempo hasta la próxima descarga de datos. La descarga de los datos se realiza desde el *data logger* (Figura 6) con conexión al puerto USB de un computador portátil mediante el software WeatherLink versión 6.0.4



Figura 6. Data logger, cable USB, consola, estación con sensores y programa de software WeatherLink [5]

Mediante el software es posible la descarga de los datos (Tabla 2) y también la programación de la estación en cuanto a unidades, variables a medir, sistema de unidades, intervalo y tiempo de muestreo.

Tabla 2. Sensores de la estación, resolución, rango, precisión [3]

Sensor (variable)	Resolución	Rango	Precisión
Temperatura	0,1°C	-40 a 65°C	±0,3°C
Humedad	0,01	1% a 100 %	±2%
Lluvia	0,2mm	0 a 6553 mm	±4%
Radiación solar	1W/m ²	0 a 1800 W/m ²	±5%
Índice UV	0,1	0 a 16	±5%
Dirección de viento	1°	0° a 360°	3°
Velocidad de viento	0,1 m/s	1 a 80 m/s	±5%
Presión Barométrica	0,1 mm Hg	410 a 820 mm Hg	0,8 mm Hg

La estación permite medir y monitorear ocho 8 variables que influyen en el clima, las variables son la temperatura, la humedad, la pluviosidad o lluvia, la velocidad del viento, la dirección del viento, la presión barométrica, la radiación solar y el índice UV [3]. Para los proyectos de aplicaciones solares fotovoltaicas y térmicas, las variables de mayor interés son la Radiación solar, el índice UV y la temperatura. La programación de la estación se realiza mediante el software tomando muestras diarias de la radiación solar en W/m², índice de UV y temperatura en grados Celsius, las muestras se programaron en un intervalo de tiempo de cada media hora durante el día. La estación proporciona un conjunto de datos y mediciones realizadas desde el 17 de diciembre del 2018 hasta el 30 de abril del 2019, que corresponde a la información de cuatro meses y medio 4.5, ya que el descargue de los datos se está realizando mensualmente, como la estación registra los datos diariamente puede observarse como varía la radiación solar, índice UV y temperatura. La Figura 7 muestra los datos registrados en la estación durante el periodo de 17 diciembre de 2018 al 16 de enero de 2019, curvas diarias de radiación solar en W/m² de color amarillo.

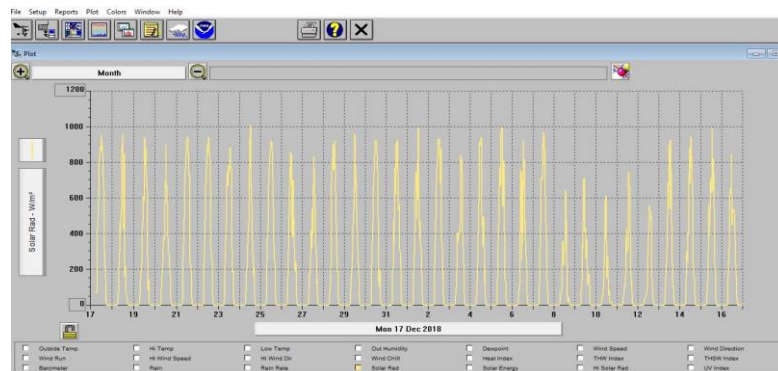


Figura 7. Datos radiación solar diaria en W/m², parque metropolitano María Lucía [5]

La Figura 8 muestra los datos registrados en la estación durante el periodo de 17 diciembre de 2018 al 16 de enero de 2019, curvas diarias de índice UV de color rosado.

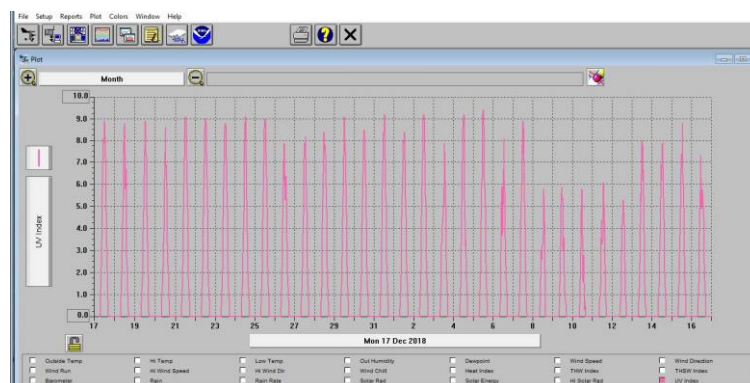


Figura 8. Datos de índice radiación UV, parque metropolitano María Lucía [5]

La Figura 9 muestra los datos registrados en la estación durante el periodo de 17 diciembre de 2018 al 16 de enero de 2019, curvas diarias de temperatura de color rojo.

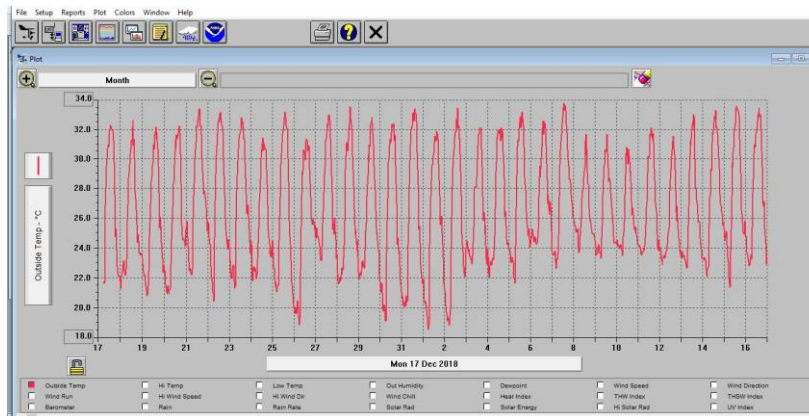


Figura 9. Datos de temperatura, parque metropolitano María Lucía [5]

Con los datos proporcionados por la estación es posible determinar la radiación global total durante un día, para lo cual se hace la sumatoria de los valores de la radiación solar desde las 6 am hasta las 6 pm. Horario de presencia del sol. Para el cálculo de una aplicación solar o térmica se utiliza el valor medio de la radiación global recibida durante una jornada (en Wh/m²) [1] en función de:

- El lugar geográfico. (Latitud, longitud, coordenadas)
- El mes del año.
- La orientación. (Sur, sureste, norte etc.)
- La inclinación. (Ángulo del panel; vertical, horizontal.)
- Características técnicas de los paneles y eficiencia
- Otros.

Para obtener los promedios diarios de la radiación solar, se toma las medidas correspondientes a un día, los datos de la radiación solar son exportados a una Tabla de Excel, donde la columna A contiene la fecha, la columna B contiene la hora del día, la columna C la radiación solar en vatios por metro cuadrado, la columna D la energía solar medida en Langley, la columna E el índice UV, la columna F la temperatura en grados Celsius. En la columna H se realiza el cálculo de la radiación solar a lo largo del día, utilizando la ecuación (1).

$$\sum_{Un\ dia} \text{Sumatoria de la radiación cada media hora durante un día} \quad (1)$$

- La *radiación total* es la suma de la radiación directa, más la radiación difusa y la radiación de albedo como se observa en la ecuación (2).

$$I_{total} = I_{directa} + I_{difusa} + I_{albedo} \quad (2)$$

- *Radiación Directa*: Es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.
- *Radiación Difusa*: Parte de la radiación que atraviesa la atmosfera es reflejada por las nubes o absorbida por estas. Esta radiación, que se denomina difusa, va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, arboles, edificios, el propio suelo, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.
- *Radiación Reflejada* o albedo: La radiación reflejada es, como su nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, llamado también albedo.

Si se observa la información de la Tabla 3, correspondiente al mes de diciembre del 2018, la radiación solar comienza a las 6:30 a.m. con un valor de 17 W/m², a las 7:00 a.m. con un valor de 67 W/m², a las 7:30 a.m. con un valor de 197 W/m² y aumentando su valor hasta las la 12:30 p.m. donde alcanza el máximo valor que es de 922 W/m², y comienza a disminuir hasta las 6:00 pm donde su valor es de 5 W/m². La sumatoria de los valores de la radiación solar desde las 6:30 a.m. hasta las 6:00 p.m. Da como resultado una radiación total en el día de 10749 vatios por metro cuadrado día, o 10.7 KW* h/m²/día, la temperatura promedio del mes es de 26,5 grados Celsius, la menor temperatura es 18,9 grados Celsius el 26 de diciembre a las 6am, la mayor temperatura es 33,5 grados Celsius el 28 de diciembre a las 2:30pm. Con índice UV de 9,1 el 24 diciembre 2018.

Tabla 3. Datos de la radiación solar del mes de diciembre de 2018 Estación parque metropolitano María Lucía

Date	Time	Solar Rad.	Solar Energy	UV Index	Temp Out	Rad solar			T. promedio diaria	Radiación diaria	Promedio mes
						Rad sumat	Promedio	Día			
31/12/2018	12:00 a.m.	0	0	0	21,1	10749	447,875	17	27,88	12711	10322,8
31/12/2018	12:30 a.m.	0	0	0	20,8			18	25,87	8861	
31/12/2018	1:00 a.m.	0	0	0	20,7			19	25,92	9663	
31/12/2018	1:30 a.m.	0	0	0	20,8			20	26,02	8302	
31/12/2018	2:00 a.m.	0	0	0	20,2			21	27,78	12244	
31/12/2018	2:30 a.m.	0	0	0	20,3			22	27,22	12443	
31/12/2018	3:00 a.m.	0	0	0	20	26,2104167		23	27,02	11281	
31/12/2018	3:30 a.m.	0	0	0	20,2			24	25,99	8773	
31/12/2018	4:00 a.m.	0	0	0	20,4			25	26,23	12170	
31/12/2018	4:30 a.m.	0	0	0	20,1	Temp alta		26	25,68	9223	
31/12/2018	5:00 a.m.	0	0	0	20,8	33,4		27	27,23	7772	
31/12/2018	5:30 a.m.	0	0	0	20,8			28	26,62	10478	
31/12/2018	6:00 a.m.	0	0	0	20,4	Temp baja		29	26,38	8632	
31/12/2018	6:30 a.m.	17	0,73	0	20,4	20		30	25,73	11540	
31/12/2018	7:00 a.m.	67	2,88	0	21,4			31	26,21	10749	
31/12/2018	7:30 a.m.	197	8,47	0,3	24,3				26,5186667	154842	
31/12/2018	8:00 a.m.	214	9,2	1,1	25,7						
31/12/2018	8:30 a.m.	470	20,21	2	28,3						
31/12/2018	9:00 a.m.	344	14,79	2,8	29,1						
31/12/2018	9:30 a.m.	486	20,9	4	29,9						
31/12/2018	10:00 a.m.	770	33,11	5,8	31						
31/12/2018	10:30 a.m.	618	26,58	7	31,9						
31/12/2018	11:00 a.m.	909	39,09	8,2	32,2						
31/12/2018	11:30 a.m.	829	35,65	8,4	32,1						
31/12/2018	12:00 p.m.	765	32,9	8,4	32,3						
31/12/2018	12:30 p.m.	922	39,65	9,2	33,1						
31/12/2018	1:00 p.m.	840	36,12	8,6	33,1						
31/12/2018	1:30 p.m.	746	32,08	7,2	32,7						
31/12/2018	2:00 p.m.	534	22,96	5,5	32,6						
31/12/2018	2:30 p.m.	566	24,34	5,2	33,3						
31/12/2018	3:00 p.m.	453	19,48	3,7	33,4						
31/12/2018	3:30 p.m.	309	13,29	2,4	33,2						
31/12/2018	4:00 p.m.	299	12,86	1,6	33,1						
31/12/2018	4:30 p.m.	210	9,03	0,9	32,6						
31/12/2018	5:00 p.m.	159	6,84	0,2	31,8						
31/12/2018	5:30 p.m.	20	0,86	0	30,4						
31/12/2018	6:00 p.m.	5	0,22	0	29,3						
31/12/2018	6:30 p.m.	0	0	0	28,3						
31/12/2018	7:00 p.m.	0	0	0	26,3						
31/12/2018	7:30 p.m.	0	0	0	25,3						
31/12/2018	8:00 p.m.	0	0	0	25,5						
31/12/2018	8:30 p.m.	0	0	0	24,4						
31/12/2018	9:00 p.m.	0	0	0	23,7						
31/12/2018	9:30 p.m.	0	0	0	22,9						
31/12/2018	10:00 p.m.	0	0	0	22,4						
31/12/2018	10:30 p.m.	0	0	0	22,1						
31/12/2018	11:00 p.m.	0	0	0	21,7						
31/12/2018	11:30 p.m.	0	0	0	21,7						

La información de la Tabla 4 correspondiente al mes de enero del 2019, la radiación solar comenzó a las 6:30 a.m. con un valor de 12 W/m², a las 7:00 a.m. con un valor de 52 W/m², a las 7:30 a.m. con un valor de 183 W/m² y aumentando su valor hasta las la 1:00 p.m. donde alcanza el máximo valor que es de 940 W/m², y comienza a disminuir hasta las 6:00 pm donde su valor es de 16 W/m². La sumatoria de los valores de la radiación solar desde las 12 a.m. hasta las 11:30 p.m. Da como resultado una radiación total en el día de 9872 vatios por metro cuadrado día. Ó 9,8 KW* h/m²/día. La temperatura promedio es 27 grados Celsius, la menor temperatura es 18,6 grados Celsius el 1 de enero a las 6:00am, la mayor temperatura es 34,7 grados Celsius el 28 de enero a las 12:00pm y un índice UV alto de 9,4 el día 5 de enero.

Tabla 4. Datos de la radiación solar del mes de enero de 2019, Estación Parque metropolitano María Lucía

Date	Time	Solar Rad.	Solar Energy	UV Index	Temp Out	Rad sumat	Promedio	Día	T. promedio diaria	Radiación diaria	Promedio mes
31/01/2019	12:00 a.m.	0	0	0	24,3	9872	411,3333333	1	25,25	9990	8262,35484
31/01/2019	12:30 a.m.	0	0	0	24,4			2	25,67	12686	
31/01/2019	1:00 a.m.	0	0	0	24,7			3	26,61	8591	
31/01/2019	1:30 a.m.	0	0	0	24,8			4	26,95	10062	
31/01/2019	2:00 a.m.	0	0	0	24,7			5	27,2	11819	

31/01/2019	2:30 a.m.	0	0	0	24,4		6	27,5	8432
31/01/2019	3:00 a.m.	0	0	0	24,2	28,6354167	7	28,18	11072
31/01/2019	3:30 a.m.	0	0	0	24,1		8	26,56	4783
31/01/2019	4:00 a.m.	0	0	0	23,9		9	26,46	6160
31/01/2019	4:30 a.m.	0	0	0	24,3	Temp alta	10	26,33	4134
31/01/2019	5:00 a.m.	0	0	0	24,2	34,4	11	26,95	6332
31/01/2019	5:30 a.m.	0	0	0	24,2		12	25,96	5095
31/01/2019	6:00 a.m.	0	0	0	23,8	Temp baja	13	26,59	8857
31/01/2019	6:30 a.m.	12	0,52	0	23,5	23,5	14	27,5	9932
31/01/2019	7:00 a.m.	52	2,24	0	24,1		15	27,63	10039
31/01/2019	7:30 a.m.	183	7,87	0,1	26		16	27,65	9186
31/01/2019	8:00 a.m.	310	13,33	0,9	28,7		17	27,33	10003
31/01/2019	8:30 a.m.	433	18,62	1,6	29,6		18	26,08	7038
31/01/2019	9:00 a.m.	398	17,12	2,3	29,3		19	26,66	6777
31/01/2019	9:30 a.m.	646	27,78	3,9	30,4		20	25,52	6497
31/01/2019	10:00 a.m.	713	30,66	5,1	31,1		21	26,71	6424
31/01/2019	10:30 a.m.	846	36,38	6,5	31,5		22	27,99	11184
31/01/2019	11:00 a.m.	823	35,39	7,3	32		23	27,68	7354
31/01/2019	11:30 a.m.	721	31,01	7,5	32,2		24	27,73	9098
31/01/2019	12:00 p.m.	525	22,58	5,9	32,2		25	27,12	6581
31/01/2019	12:30 p.m.	496	21,33	5,8	32,8		26	27,28	6678
31/01/2019	1:00 p.m.	940	40,43	7,9	33,8		27	28,02	8356
31/01/2019	1:30 p.m.	285	12,26	4,4	32,9		28	28,9	9436
31/01/2019	2:00 p.m.	716	30,79	5,3	34,4		29	28,47	8858
31/01/2019	2:30 p.m.	425	18,28	3,9	33,6		30	26,11	4807
31/01/2019	3:00 p.m.	519	22,32	3,5	33,5		31	28,63	9872
31/01/2019	3:30 p.m.	353	15,18	2,5	33,9			27,0716129	
31/01/2019	4:00 p.m.	158	6,79	1,7	33,4				
31/01/2019	4:30 p.m.	150	6,45	0,8	33,9				
31/01/2019	5:00 p.m.	91	3,91	0,3	32,8				
31/01/2019	5:30 p.m.	61	2,62	0	32,6				
31/01/2019	6:00 p.m.	16	0,69	0	31,7				
31/01/2019	6:30 p.m.	0	0	0	30,6				
31/01/2019	7:00 p.m.	0	0	0	30,2				
31/01/2019	7:30 p.m.	0	0	0	29,4				
31/01/2019	8:00 p.m.	0	0	0	29,1				
31/01/2019	8:30 p.m.	0	0	0	28,8				
31/01/2019	9:00 p.m.	0	0	0	28,1				
31/01/2019	9:30 p.m.	0	0	0	27,7				
31/01/2019	10:00 p.m.	0	0	0	27,1				
31/01/2019	10:30 p.m.	0	0	0	26,4				
31/01/2019	11:00 p.m.	0	0	0	25,8				
31/01/2019	11:30 p.m.	0	0	0	25,4				

La información de la Tabla 5 correspondiente al mes de febrero del 2019, la radiación solar comenzó a las 6:30 a.m. con un valor de 9 W/m², a las 7:00 a.m. con un valor de 47 W/m², a las 7:30 a.m. con un valor de 187 W/m² y aumentando su valor hasta las la 1:00 p.m. donde alcanza el máximo valor que es de 1009 W/m², y comienza a disminuir hasta las 6:00 pm donde su valor es de 9 W/m². La sumatoria de los valores de la radiación solar desde las 6:30 a.m. hasta las 6:00 p.m. Da como resultado una radiación total en el día de 9362 vatios por metro cuadrado día. Ó 9,3 KW* h/m²/día. La temperatura promedio de 28,24 grados Celsius, la menor temperatura es 20,4 grados Celsius el 21 de febrero, la mayor temperatura es 35,6 el día 15 febrero y el índice UV de 9,6 el 21de febrero.

Tabla 5. Datos de la radiación solar del mes febrero de 2019, Estación parque metropolitano María Lucía

Date	Time	Solar Rad.	Solar Energy	UV Index	Temp Out	Rad sumat	Promedio	Día	T. promedio diaria	Radiación diaria	Promedio mes
28/02/2019	12:00 a.m.	0	0	0	23,9	9362	390,083333	1	27,59	10276	9467,14286
28/02/2019	12:30 a.m.	0	0	0	24,1			2	27,55	10531	
28/02/2019	1:00 a.m.	0	0	0	23,6			3	28,5	11975	
28/02/2019	1:30 a.m.	0	0	0	23,2			4	27,15	6784	
28/02/2019	2:00 a.m.	0	0	0	22,9			5	26,77	6876	
28/02/2019	2:30 a.m.	0	0	0	22,4			6	26,39	7088	
28/02/2019	3:00 a.m.	0	0	0	22	28,1375		7	27,97	7617	
28/02/2019	3:30 a.m.	0	0	0	21,7			8	28,87	10616	
28/02/2019	4:00 a.m.	0	0	0	21,9			9	28,88	9627	
28/02/2019	4:30 a.m.	0	0	0	22,1	Temp alta		10	28,84	7812	
28/02/2019	5:00 a.m.	0	0	0	21,8	34,8		11	28,06	10801	
28/02/2019	5:30 a.m.	0	0	0	22,2			12	28,07	10915	
28/02/2019	6:00 a.m.	0	0	0	22,8	Temp baja		13	29,12	11269	
28/02/2019	6:30 a.m.	9	0,39	0	22,9	21,7		14	28,25	10108	

28/02/2019	7:00 a.m.	47	2,02	0	23,1		15	28,65	11618
28/02/2019	7:30 a.m.	187	8,04	0,2	25,8		16	27,8	6345
28/02/2019	8:00 a.m.	271	11,65	0,9	28,7		17	27,67	9823
28/02/2019	8:30 a.m.	324	13,93	1,5	29,8		18	27,41	5055
28/02/2019	9:00 a.m.	611	26,28	2,7	31,1		19	28,62	10181
28/02/2019	9:30 a.m.	527	22,66	3,5	31		20	29,61	11226
28/02/2019	10:00 a.m.	757	32,56	5,2	32,4		21	29,32	11746
28/02/2019	10:30 a.m.	842	36,21	6,6	32,6		22	29,35	9337
28/02/2019	11:00 a.m.	883	37,97	7,5	33,5		23	29,26	9284
28/02/2019	11:30 a.m.	856	36,81	7,7	33,8		24	28	6140
28/02/2019	12:00 p.m.	919	39,52	8,6	34,1		25	28,15	12059
28/02/2019	12:30 p.m.	601	25,85	6,6	33,7		26	27,91	11869
28/02/2019	1:00 p.m.	1009	43,39	8,2	34,8		27	29,1	8740
28/02/2019	1:30 p.m.	466	20,04	5,9	34,6		28	28,13	9362
28/02/2019	2:00 p.m.	403	17,33	4,4	34,8			28,2496429	
28/02/2019	2:30 p.m.	221	9,5	2,2	34,4				
28/02/2019	3:00 p.m.	127	5,46	1,1	34,1				
28/02/2019	3:30 p.m.	68	2,92	0,2	32,9				
28/02/2019	4:00 p.m.	75	3,23	0,2	32,2				
28/02/2019	4:30 p.m.	68	2,92	0	31,6				
28/02/2019	5:00 p.m.	51	2,19	0	31,5				
28/02/2019	5:30 p.m.	31	1,33	0	31,3				
28/02/2019	6:00 p.m.	9	0,39	0	31,1				
28/02/2019	6:30 p.m.	0	0	0	29,9				
28/02/2019	7:00 p.m.	0	0	0	29,3				
28/02/2019	7:30 p.m.	0	0	0	28,9				
28/02/2019	8:00 p.m.	0	0	0	28,4				
28/02/2019	8:30 p.m.	0	0	0	27,3				
28/02/2019	9:00 p.m.	0	0	0	26,4				
28/02/2019	9:30 p.m.	0	0	0	25,8				
28/02/2019	10:00 p.m.	0	0	0	25,8				
28/02/2019	10:30 p.m.	0	0	0	25,9				
28/02/2019	11:00 p.m.	0	0	0	26,3				
28/02/2019	11:30 p.m.	0	0	0	26,2				

La información de la Tabla 6 correspondiente al mes de marzo del 2019, la radiación solar comenzó a las 6:30 a.m. con un valor de 7 W/m², a las 7:00 a.m. con un valor de 25 W/m², a las 7:30 a.m. con un valor de 88 W/m² y aumentando su valor hasta las la 11:00 a.m. donde alcanza el máximo valor que es de 449 W/m², y comienza a disminuir hasta las 6:00 pm donde su valor es de 13 W/m². La sumatoria de los valores de la radiación solar desde las 6:30 a.m. hasta las 6:00 p.m. Da como resultado una radiación total en el día de 4503 vatios por metro cuadrado día. Ó 4,5 KW* h/m²/día. La temperatura promedio es 26,6 grados Celsius, la mayor temperatura es 35,2 grados Celsius el día 1 de marzo, la menor temperatura es 21,6 grados Celsius el día 11 de marzo y el índice UV más alto es 8,7 el día 1 de marzo.

Tabla 6. Datos de la radiación solar del mes de marzo de 2019, Estación parque metropolitano María Lucía

Date	Time	Solar Rad.	Solar Energy	UV Index	Temp Out	Rad. sumat	Rad. promedio	Día	T. promedio diaria	Radiación diaria	Promedio mes
31/03/2019	12:00 a.m.	0	0	0	24,6	4503	187,625	1	29,22	8196	6055,19355
31/03/2019	12:30 a.m.	0	0	0	24,4			2	28,45	7511	
31/03/2019	1:00 a.m.	0	0	0	24,3			3	26,24	4101	
31/03/2019	1:30 a.m.	0	0	0	24,3	Temperatura		4	27,7	8998	
31/03/2019	2:00 a.m.	0	0	0	24,2	promedio		5	28,58	5340	
31/03/2019	2:30 a.m.	0	0	0	24,3	diaria		6	28,95	5553	
31/03/2019	3:00 a.m.	0	0	0	24,3	24,6916667		7	28,76	7293	
31/03/2019	3:30 a.m.	0	0	0	24,3			8	27,21	6794	
31/03/2019	4:00 a.m.	0	0	0	24,2			9	26,73	5277	
31/03/2019	4:30 a.m.	0	0	0	24,2	Temp alta		10	24,5	3387	
31/03/2019	5:00 a.m.	0	0	0	24,1	28,3		11	24,84	4927	
31/03/2019	5:30 a.m.	0	0	0	24			12	25,51	4782	
31/03/2019	6:00 a.m.	0	0	0	23,9	Temp baja		13	26,75	6901	
31/03/2019	6:30 a.m.	7	0,3	0	23,8	22,7		14	27,78	7643	
31/03/2019	7:00 a.m.	25	1,08	0	24,1			15	24,36	2548	
31/03/2019	7:30 a.m.	88	3,78	0	24,4			16	27,32	6712	
31/03/2019	8:00 a.m.	137	5,89	0,6	25,1			17	26,93	5995	
31/03/2019	8:30 a.m.	150	6,45	0,9	25,4			18	25,03	4348	
31/03/2019	9:00 a.m.	129	5,55	1	25,5			19	26,61	6689	
31/03/2019	9:30 a.m.	193	8,3	1,5	25,8			20	25,39	3362	
31/03/2019	10:00 a.m.	349	15,01	2,9	26,6			21	26,39	4740	
31/03/2019	10:30 a.m.	482	20,73	4,2	27,3			22	25,8	4976	

31/03/2019	11:00 a.m.	449	19,31	4,3	27,6		23	25,81	4852
31/03/2019	11:30 a.m.	429	18,45	4,5	28,2		24	25,35	5311
31/03/2019	12:00 p.m.	416	17,89	4,4	28,3		25	27,01	9277
31/03/2019	12:30 p.m.	485	20,86	5,1	28,3		26	28,11	10340
31/03/2019	1:00 p.m.	382	16,43	4	28,3		27	28,34	10372
31/03/2019	1:30 p.m.	137	5,89	1,3	26,3		28	26,27	8478
31/03/2019	2:00 p.m.	101	4,34	0,9	25,7		29	26,05	4633
31/03/2019	2:30 p.m.	48	2,06	0,2	24,8		30	24,82	3872
31/03/2019	3:00 p.m.	132	5,68	1	24,6		31	24,69	4503
31/03/2019	3:30 p.m.	54	2,32	0,2	24,3			26,6290323	187711
31/03/2019	4:00 p.m.	87	3,74	0,5	24,4				
31/03/2019	4:30 p.m.	89	3,83	0,3	24,6				
31/03/2019	5:00 p.m.	79	3,4	0	24,8				
31/03/2019	5:30 p.m.	42	1,81	0	24,7				
31/03/2019	6:00 p.m.	13	0,56	0	24,3				
31/03/2019	6:30 p.m.	0	0	0	23,8				
31/03/2019	7:00 p.m.	0	0	0	23,4				
31/03/2019	7:30 p.m.	0	0	0	23,2				
31/03/2019	8:00 p.m.	0	0	0	23,1				
31/03/2019	8:30 p.m.	0	0	0	22,9				
31/03/2019	9:00 p.m.	0	0	0	22,8				
31/03/2019	9:30 p.m.	0	0	0	22,8				
31/03/2019	10:00 p.m.	0	0	0	22,7				
31/03/2019	10:30 p.m.	0	0	0	22,8				
31/03/2019	11:00 p.m.	0	0	0	22,7				
31/03/2019	11:30 p.m.	0	0	0	22,7				

La información de la Tabla 7 correspondiente al mes de abril del 2019, la radiación solar comenzó a las 6:00 a.m. con un valor de 3 W/m², a las 6:30 a.m. con un valor de 32 W/m², a las 7:00 a.m. con un valor de 128 W/m², a las 7:30 a.m. con un valor de 200 W/m² y aumentando su valor hasta las la 12:00 p.m. donde alcanza el máximo valor que es de 901 W/m², y comienza a disminuir hasta las 6:00 pm donde su valor es de 15 W/m². La sumatoria de los valores de la radiación solar desde las 6:00 a.m. hasta las 6:00 p.m. Da como resultado una radiación total en el día de 11530 vatios por metro cuadrado día. Ó 11,5 KW* h/m²/día. La temperatura promedio es de 25,9 grados Celsius, la temperatura más alta es 33,8 grados Celsius el día 7 abril, la temperatura más baja es 21,8 grados Celsius el día 8 de abril y el índice UV mayor es 11,4 el día 25 de abril.

Tabla 7. Datos de la radiación solar del mes abril de 2019, Estación parque metropolitano María Lucía

Date	Time	Solar Rad.	Solar Energy	UV Index	Temp Out	Rad. sumat	Promedio	Día	T. prom diaria	Radiación diaria	Promedio mes
30/04/2019	12:00 a.m.	0	0	0	23,6	11530	480,416667	1	25,1	8021	7427,2
30/04/2019	12:30 a.m.	0	0	0	23,4			2	26,3	9103	
30/04/2019	1:00 a.m.	0	0	0	23,3			3	26,37	5296	
30/04/2019	1:30 a.m.	0	0	0	23,4	Radiación		4	27,96	9092	
30/04/2019	2:00 a.m.	0	0	0	23,4	Meses		5	27,38	5083	
30/04/2019	2:30 a.m.	0	0	0	23,3	dic-18	10322,8	6	28,05	8347	
30/04/2019	3:00 a.m.	0	0	0	23,3	ene-19	8262,3	7	28,71	9012	
30/04/2019	3:30 a.m.	0	0	0	22,9	feb-19	9467,1	8	26,11	7172	
30/04/2019	4:00 a.m.	0	0	0	22,6	mar-19	6055,1	9	25,62	8020	
30/04/2019	4:30 a.m.	0	0	0	22,9	abr-19	7427,2	10	26,34	9842	
30/04/2019	5:00 a.m.	0	0	0	22,6		8306,9	11	25,84	7802	
30/04/2019	5:30 a.m.	0	0	0	22,4			12	25,41	6718	
30/04/2019	6:00 a.m.	3	0,13	0	23	Temperatura		13	25,8	6649	
30/04/2019	6:30 a.m.	32	1,38	0	23,3	promedio		14	26,7	10911	
30/04/2019	7:00 a.m.	128	5,5	0	24,3	diaria		15	24,81	4075	
30/04/2019	7:30 a.m.	200	8,6	0,7	25,4	27,1104167		16	25,87	8055	
30/04/2019	8:00 a.m.	218	9,38	1,1	25,9			17	25,78	8599	
30/04/2019	8:30 a.m.	303	13,03	1,9	26,8			18	23,44	2983	
30/04/2019	9:00 a.m.	551	23,7	3,4	28,9	Temp alta		19	25,87	8609	
30/04/2019	9:30 a.m.	668	28,73	4,7	29,9	32,1		20	24,26	3279	
30/04/2019	10:00 a.m.	715	30,75	5,5	30,9			21	25,65	7847	
30/04/2019	10:30 a.m.	767	32,99	6,5	30,9			22	25,02	7734	
30/04/2019	11:00 a.m.	819	35,22	7,7	31	temp baja		23	26,9	10667	
30/04/2019	11:30 a.m.	886	38,1	8,5	31,4	22,4		24	24,93	5728	
30/04/2019	12:00 p.m.	901	38,75	9,1	31,6			25	25,44	6940	
30/04/2019	12:30 p.m.	886	38,1	8,9	31,7			26	25,24	7500	
30/04/2019	1:00 p.m.	901	38,75	7,4	32			27	24,87	5687	
30/04/2019	1:30 p.m.	838	36,04	5,3	32,1			28	24,66	5757	
30/04/2019	2:00 p.m.	716	30,79	6	32			29	25,66	6758	
30/04/2019	2:30 p.m.	524	22,53	4,1	31,8			30	27,11	11530	

30/04/2019	3:00 p.m.	557	23,95	3,7	32,1	25,9066667
30/04/2019	3:30 p.m.	418	17,98	2,5	31,9	
30/04/2019	4:00 p.m.	229	9,85	1,4	31,8	
30/04/2019	4:30 p.m.	98	4,21	0,8	31,3	
30/04/2019	5:00 p.m.	90	3,87	0,2	30,9	
30/04/2019	5:30 p.m.	67	2,88	0	30,4	
30/04/2019	6:00 p.m.	15	0,65	0	29,4	
30/04/2019	6:30 p.m.	0	0	0	27,7	
30/04/2019	7:00 p.m.	0	0	0	26,9	
30/04/2019	7:30 p.m.	0	0	0	26,7	
30/04/2019	8:00 p.m.	0	0	0	26,6	
30/04/2019	8:30 p.m.	0	0	0	26,5	
30/04/2019	9:00 p.m.	0	0	0	25,8	
30/04/2019	9:30 p.m.	0	0	0	25,1	
30/04/2019	10:00 p.m.	0	0	0	24,9	
30/04/2019	10:30 p.m.	0	0	0	24,7	
30/04/2019	11:00 p.m.	0	0	0	24,3	
30/04/2019	11:30 p.m.	0	0	0	24,3	

La información de la Tabla 8 correspondiente al mes de mayo del 2019, la radiación solar comenzó a las 6:00 a.m. con un valor de 11 W/m², a las 6:30 a.m. con un valor de 37 W/m², a las 7:00 a.m. con un valor de 49 W/m², a las 7:30 a.m. con un valor de 76 W/m² y aumentando su valor hasta las la 12:30 p.m. donde alcanza el máximo valor que es de 1004 W/m², y comienza a disminuir hasta las 6:00 pm donde su valor es de 5 W/m². La sumatoria de los valores de la radiación solar desde las 6:00 a.m. hasta las 6:00 p.m. Da como resultado una radiación total en el día de 7813 vatios por metro cuadrado día. Ó 7,8 KW* h/m²/día. Y promedio mensual de 8206,7 W/m² o 8,2 KW*h/m². La temperatura promedio es de 25,22 grados Celsius, la temperatura más a alta es 32,7 grados Celsius el día 1 mayo, la temperatura más baja es 20,8 grados Celsius el día 14 de mayo y el índice UV mayor es 11,1 los días 10 y 17 de mayo.

Tabla 8. Datos de la radiación solar del mes mayo de 2019, Estación parque metropolitano María Lucía

Date	Time	Solar Rad.	Solar Energy	UV Index	Temp Out	Rad sumat	Promedio	Día	T. prom diaria	Radiación diaria	Promedio mes
17/05/2019	12:00 a.m.	0	0	0	22,2	7813	312,52	1	27,41	11742	
17/05/2019	12:30 a.m.	0	0	0	22,2			2	27,57	7949	
17/05/2019	1:00 a.m.	0	0	0	22,3			3	26,27	7654	
17/05/2019	1:30 a.m.	0	0	0	22,4			4	24,28	3872	
17/05/2019	2:00 a.m.	0	0	0	22,3			5	25,32	10114	
17/05/2019	2:30 a.m.	0	0	0	22,3			6	23,92	3680	
17/05/2019	3:00 a.m.	0	0	0	22,3			7	26,8	10525	
17/05/2019	3:30 a.m.	0	0	0	22,3			8	25,13	7581	
17/05/2019	4:00 a.m.	0	0	0	22,3			9	23,1	3417	
17/05/2019	4:30 a.m.	0	0	0	22,4	Temperatura		10	25,33	12190	
17/05/2019	5:00 a.m.	0	0	0	22,5	promedio		11	25,92	10862	
17/05/2019	5:30 a.m.	0	0	0	22,5	diaria		12	26,35	9531	
17/05/2019	6:00 a.m.	11	0,47	0	22,4	24,2458333		13	24,15	6789	
17/05/2019	6:30 a.m.	37	1,59	0	22,6			14	22,83	4088	
17/05/2019	7:00 a.m.	49	2,11	0	22,6			15	25,17	10183	
17/05/2019	7:30 a.m.	76	3,27	0,2	22,8	Temp alta		16	24,95	11524	
17/05/2019	8:00 a.m.	184	7,91	1,1	23,6	29,1		17	24,24	7813	
17/05/2019	8:30 a.m.	283	12,17	2,3	24,9			18			
17/05/2019	9:00 a.m.	475	20,43	3,7	26,3	Temp baja		19			
17/05/2019	9:30 a.m.	457	19,65	4,8	27,1	22,2		20			
17/05/2019	10:00 a.m.	427	18,36	5,1	27,4			21			
17/05/2019	10:30 a.m.	571	24,56	6,5	28,1			22			
17/05/2019	11:00 a.m.	416	17,89	5,4	27,1			23			
17/05/2019	11:30 a.m.	496	21,33	6,7	27,3			24			
17/05/2019	12:00 p.m.	886	38,1	10,4	28,2			25			
17/05/2019	12:30 p.m.	1004	43,18	11,1	29,1			26			
17/05/2019	1:00 p.m.	477	20,51	5,2	27,2			27			
17/05/2019	1:30 p.m.	807	34,71	6,1	27,9			28			
17/05/2019	2:00 p.m.	654	28,13	4,7	28,7			29			
17/05/2019	2:30 p.m.	205	8,82	2,9	28,2			30			
17/05/2019	3:00 p.m.	76	3,27	0,6	26,7			31			
17/05/2019	3:30 p.m.	44	1,89	0,1	24,4						
17/05/2019	4:00 p.m.	52	2,24	0,3	23,8						
17/05/2019	4:30 p.m.	59	2,54	0	23,9						
17/05/2019	5:00 p.m.	44	1,89	0	24,1						
17/05/2019	5:30 p.m.	18	0,77	0	23,8						

17/05/2019	6:00 p.m.	5	0,22	0	23,4
17/05/2019	6:30 p.m.	0	0	0	23,2
17/05/2019	7:00 p.m.	0	0	0	23,1
17/05/2019	7:30 p.m.	0	0	0	23,1
17/05/2019	8:00 p.m.	0	0	0	23,3
17/05/2019	8:30 p.m.	0	0	0	23,3
17/05/2019	9:00 p.m.	0	0	0	23,3
17/05/2019	9:30 p.m.	0	0	0	23,2
17/05/2019	10:00 p.m.	0	0	0	23,2
17/05/2019	10:30 p.m.	0	0	0	22,9
17/05/2019	11:00 p.m.	0	0	0	22,8
17/05/2019	11:30 p.m.	0	0	0	22,8

La radiación promedio correspondiente a los cinco meses y medio desde la instalación de la estación indican un valor de 8306,9 W/m² o 8,3 Kw h/m² y un valor medio de 4 Kw h/m², que es un valor que está comprendido en el intervalo que aparece en el mapa del atlas de radiación solar de Colombia para el año 2018 en la zona de Villavicencio y Meta. Sucede lo mismo con los datos correspondientes al mes de enero, si compara este valor de 9,8 KW* h/m²/día con el que aparece en el atlas de radiación solar del mes de enero de Colombia que oscila entre 4.0 y 5.0 KW* h/m²/día, que corresponde al valor de la radiación media. Que es de 4,9 KW* h/m²/día, valor que está en el intervalo que muestran los mapas de radiación de Colombia, referente a los meses de enero 1018 y 2019 (Figuras 10 y 11). Con los datos de la radiación y la temperatura se procede a realizar la gráfica cartesiana de radiación solar versus horas del día y de la gráfica en columna de temperatura versus hora del día, información que se puede ver en las anteriores Tablas. Este dato de la radiación y la temperatura es necesario para los cálculos de los diseños de sistemas tanto fotovoltaicos y térmicos como se puede observar en las ecuaciones.

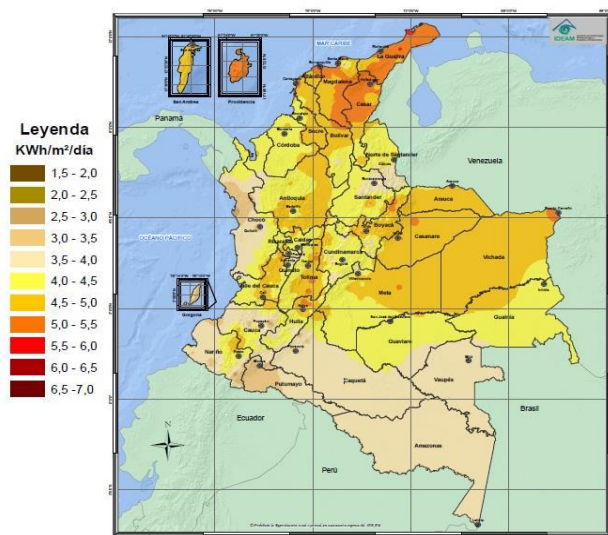


Figura 10. Mapa de radiación solar en Colombia del mes de enero 2018 [2]

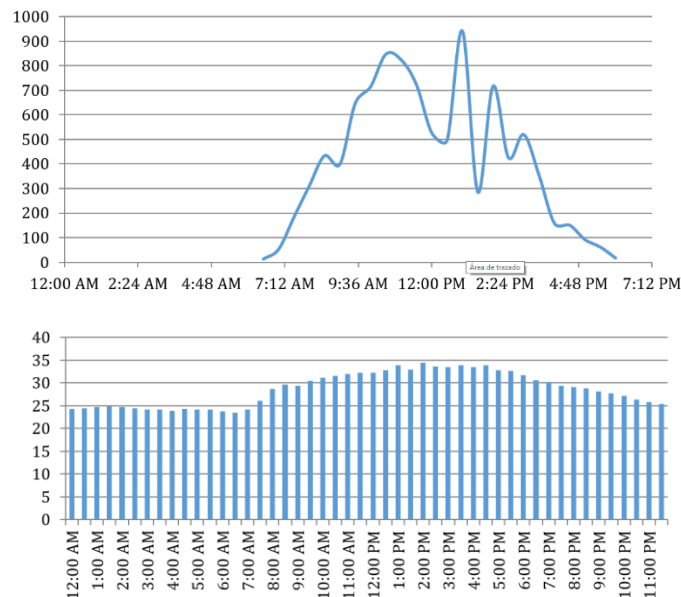


Figura 11. Radiación solar mes enero 2019, Temperatura en grados Celsius, Estación parque metropolitano María Lucía

La potencia del panel fotovoltaico en un sistema FV se calcula con la ecuación (3).

$$P_p = \frac{(E_d * 1.15)}{(R_\beta * \eta_r)} \quad (3)$$

Donde:

P_p = Potencia _ pico _ del _ panel _ fotovoltaico(W)

E_d = Energía _ diaria _ máxima(Wh / día)

1,15 = Factor _ de _ seguridad

R_β = Radiación _ mínima _ diaria(kw.h / m² / día)

η_r = Re nd im iento _ del _ c arg ador(%)

La potencia instalada en un sistema fotovoltaico se calcula con la ecuación (4).

$$P = \eta * A * RSA \quad (4)$$

Donde:

η = re nd im iento _ del _ módulo

A = área _ del _ panel _ m²

RSI = radiación _ solar _ incidente _ W / m²

Los Sistemas Termo solares Heliostatos con la ecuación (5).

$$P = \eta * I * N * S_h \quad (5)$$

Donde:

η = re nd im iento _ total

I = radiación _ solar _ directa

N = número _ de _ heliostatos

S_h = Superficie _ de _ cada _ heliostato

El rendimiento del colector en un panel solar térmico con la ecuación (6).

$$\eta = b - \frac{m(t_m - t_a)}{I} \quad (6)$$

Donde:

η = re nd im iento

b = ganancia _ del _ colector

m = pérdidas _ térmicas _ W / m²C°

t_m = temperatura _ media _ del _ captador

t_a = temperatura _ ambiente _ media _ durante _ las _ horas _ de _ sol

I = int ensidad _ de _ la _ radiación _ media(W / m²)

3. RESULTADOS

- Como se puede ver en la Tabla 3 correspondiente al mes de diciembre del 17 al 31 diciembre 2018, el día 17 presenta radiación solar más intensa con un valor de 12711 W/m², la menor el día 27 con valor 7772 W/m² y promedio mensual de 10322,8 W/m², con temperaturas entre 22 a 34 grados Celsius.
- Para el mes de enero del 1 al 31 del 2019, la mayor radiación se presenta el día 2 de enero con un valor de 12686 W/m², la menor el día 10 con valor de 4134 W/m² y promedio mensual de 8262,3 W/m², con temperaturas entre 22 a 34 grados Celsius.
- Para el mes de febrero del 1 al 28 del 2019, la mayor radiación se presenta el día 25 con un valor de 12059 W/m², la menor el día 18 con valor de 5055 W/m² y promedio mensual de 9467,1 W/m², con temperaturas entre 22 a 34 grados Celsius.
- Entre el 1 y el 31 de marzo de 2019, la mayor radiación se presenta el día 27 con un valor de 10372 W/m², la menor el día 15 con valor 2548 W/m², y promedio mensual de 6055,1 W/m², con temperaturas entre 22-34 °C.

- Para el mes de abril de 1 al 30 del 2019, la mayor radiación se presenta el día 30 con un valor de 11530 W/m², la menor el día 18 con valor 2983 W/m², y promedio mensual de 7427,2 W/m², con temperaturas entre 22 a 34 grados Celsius.
- De los cinco meses y medio la radiación la radiación más intensa se presenta en el mes de diciembre con promedio de 10322,8 Kw*h/m² y la radiación más baja se presenta en el mes de marzo con un valor de 6055,1 Kw*h/m².

4. CONCLUSIONES

- Los valores más bajos de radiación solar representan los puntos críticos, en los cuales el sistema fotovoltaico y térmico podría fallar, o presentar un valor de energía eléctrica más bajos de los necesarios por el sistema. Ya que habitualmente se utilizan valores medios y promedios.
- Los valores de radiación solar bajos determinan que, si se trabaja con el valor más bajo, los costos de implementación de sistema son mayores por que representan un mayor número de paneles tanto fotovoltaicos como térmicos, mayores áreas de captación incrementando los costos del sistema, pero se asegura que el sistema funciona aun con los niveles más bajos de radiación solar y temperatura.
- Otra alternativa para evitar el fallo del sistema es no depender única y exclusivamente de un sistema de generación, sino complementarlo con otros sistemas, diversificando la matriz de producción de energía, implementando sistemas híbridos y combinando los recursos disponibles en el sitio.
- Estos valores bajos de radiación son debidos a la mayor nubosidad en el día y tiempos más prolongados del mismo, en especial en las horas pico solares HPS que están comprendidas entre las 10 de la mañana y 3 de la tarde.

REFERENCIAS

- [1] J. P. Braun, B. Faraggi, A. Labouret. Celdas solares. Editorial Trillas, 1999, P 34.
- [2] H. Benavides. Atlas de radiación solar en Colombia. 2017, P 68.
- [3] Davis Instrument. Manual de usuario estación. 2017, Vantage pro 2. Modelo 6162
- [4] Davis Instrument. Manual de usuario. 2017, Sensores de radiación solar y UV. Modelo 6450
- [5] Davis Instrument. Manual de usuario. 2017, Guía de manejo software. WeatherLink.
- [6] M. A. Sánchez Maza. Energía solar fotovoltaica. Editorial Limusa. 2008, P 156, P 159.
- [7] M. A. Sánchez Maza. Energía solar térmica. Editorial Limusa. 2015, P 14, P 25, P 147.
- [8] C. Tobajas Vásquez. Instalaciones solares fotovoltaicas. Ediciones de la U. 2015, P 36.
- [9] Unidad de Planeación Minero Energética. UPME. Colombia. Mapa, 2017.

Segmentación y análisis de imágenes termográficas para la detección de cáncer de mama

Diannys Granadillo B.¹

Yaileth Morales²

Cesar Torres M.³

Eberto Benjumea⁴

Universidad Popular del Cesar – Colombia

El cáncer de mama, es una enfermedad que se origina cuando las células en el seno comienzan a crecer en forma descontrolada. No se predice, pues los factores que inciden principalmente en el padecimiento de esta patología son genéticos y lo pueden padecer tanto mujeres como hombres. El cáncer de mama es el cáncer más frecuente entre las mujeres a nivel mundial y representa un 16% de todos los cánceres femeninos. En Colombia se estima que cada año son reportados alrededor de 8600 casos y 2660 mujeres fallecen debido a ésta. Las variaciones de temperatura en la piel son indicadores orgánicos de varios tipos de cáncer, entre estos el cáncer de mama tipo carcinoma (ductal infiltrante y lobulillar invasivo). El método más utilizado para la detección de cáncer de mama es la mamografía, radiación que arroja una imagen anatómica de la mama, mediante la cual se pueden observar formaciones atípicas en el tejido. La mamografía, "al utilizar rayos X, que son radiación ionizante, puede causar problemas. No se pueden tomar más de tres o cuatro radiografías al año, tampoco las mujeres embarazadas pueden realizarse mamografías". Por esta razón se han buscado otras alternativas de diagnóstico menos invasivas, dolorosas y traumáticas. En este escenario es donde aparece la termografía infrarroja. Se trata de una técnica que permite evaluar el comportamiento y fisionomía de los tejidos usando como base la temperatura que estos tienen. En ese sentido, los tejidos enfermos como aquellos que están afectados por algún tipo de cáncer pueden presentar diferentes niveles de temperatura si se comparan con aquellos que se encuentran sanos. Teniendo en cuenta esto, el cáncer de mama es una enfermedad que puede ser caracterizada, detectada y analizada usando imágenes termográficas. En este trabajo se desarrolló un algoritmo para detectar el cáncer de mama a través del procesamiento de imágenes termográficas mamarias. El proceso digital se basa en identificación de área de interés, segmentación de colores y discriminación cuantitativa por tonalidad del color. El algoritmo desarrollado está contenido en una interfaz gráfica para facilitar su uso. Este mostró resultados satisfactorios para identificar ausencia o presencia de anomalías en el seno.

1. INTRODUCCIÓN

El cáncer de mama, es una enfermedad que se origina cuando las células en el seno comienzan a crecer en forma descontrolada. No se predice, pues los factores que inciden principalmente en el padecimiento de esta patología son genéticos y lo pueden padecer tanto mujeres como hombres [1]. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el cáncer más frecuente entre las mujeres es el de mama, que a nivel mundial representa 16% de todos los cánceres femeninos. Se estima que cada año se detectan 1.38 millones de casos nuevos. Este padecimiento se presenta con más frecuencia en países desarrollados, pero tiene mayor impacto en la población de países de bajos y medios ingresos [2]. Por lo cual es muy importante encontrar herramientas útiles para su detección en una etapa temprana. Un adecuado diagnóstico permite al especialista tomar una decisión del tratamiento que debe ser administrado al paciente de acuerdo al tipo de anomalía encontrada.

Las imágenes médicas constituyen una herramienta fundamental durante el análisis y estudio de diferentes patologías [3] - [5]. Las mamografías y el ultrasonido son las técnicas más usadas para el diagnóstico de cáncer de mama. No obstante, esta técnica presenta muchas dificultades cuando es aplicada a mujeres jóvenes y además puede ser agresiva para los pacientes, por la radiación que posee. Por lo tanto, la termografía constituye una alternativa que supera las desventajas de otro tipo de herramienta de imagen clínica. Esta modalidad de imagenología es aplicada al tejido mamario en una etapa primaria de diagnóstico y es importante debido a que es una técnica no invasiva, de bajo costo y no usa radiación ionizante [3].

La termografía infrarroja presenta un análisis funcional de la mama. Esta técnica puede ser utilizada para detectar y analizar el cáncer que se desarrolla en estos tejidos. La interpretación correcta de una imagen obtenida mediante termografía puede ayudar en la detección temprana del cáncer. Los tumores cancerosos, específicamente los de cáncer de mama tipo carcinoma, tienen una generación de calor metabólica más alta porque las células se reproducen más rápido que en el tejido normal, Esas variaciones de temperatura pueden ser captadas a través de la termografía infrarroja" [6]. El uso de esta tecnología, es muy útil en la evaluación de problemas vasculares o algún tipo de cáncer. El análisis es realizado usando diferencias de temperatura en una región determinada y teniendo en cuenta la simetría de las mamas. En general, estas evaluaciones cuantitativas son dadas por la diferencia de temperatura de 1 °C que están asociadas a problemas como el cáncer y angiogénesis. Un rango de variación de la diferencia de temperatura puede corresponder al diagnóstico de tumores benignos [7].

En imágenes termográficas, muchas de las evaluaciones desarrolladas por los especialistas requieren de métodos y técnicas de segmentación para el análisis de mama. Estos métodos son utilizados para la identificación de problemas

¹ ddgranadillo@unicesar.edu.co

² morales.yaileth@unicesar.edu.co

³ cesartorres@unicesar.edu.co

⁴ elbenjumea@unicesar.edu.co

tales como tumores o anomalías. Por lo general, este análisis requiere de algún tipo de implicación manual por los médicos, haciendo que estas tareas sean tediosas, conlleven mucho tiempo y estén asociadas a la dependencia del operador [8], [9]. Por tal razón, es necesario y de beneficio desarrollar técnicas robustas para el análisis en imágenes de termografías de la mama. Se han propuesto técnicas de procesamiento de imágenes para la segmentación automática y semiautomática de termogramas de mama [10], [11]. Estas aplicaciones son tenidas en cuenta como herramientas de ayuda diagnóstica por los especialistas para la identificación de problemas en la mama. El análisis de técnicas de segmentación en imágenes termográficas ha sido desarrollado por los investigadores utilizando varios enfoques. Entre los trabajos realizados se encuentran operadores matemáticos, métodos estadísticos, redes neuronales y soporte vectorial [12], [13]. Muchos autores han realizado sus contribuciones sobre estas técnicas sobre termografía. No obstante, las aplicaciones en segmentación y análisis en la detección de cáncer de mama usando termogramas aún abarca un gran campo de trabajo.

En esta investigación se desarrolló un método para el prediagnóstico de cáncer de mama a través de algoritmo de segmentación y análisis de imágenes termográficas con el fin de contribuir en la detección temprana de patologías cancerígenas en el seno; para ello se utilizó una base de datos con imágenes termográficas existente, cortesía de Visual Lab-DMR de pacientes con cáncer de mama, identificando a través de un mapa térmico variaciones en la piel que indiquen la presencia o ausencia de cáncer y por último se desarrolló una herramienta digital de apoyo al especialista en la salud, para el análisis e identificación temprana de anomalías, que interrelaciona la adquisición de las imágenes termográficas, con los diferentes algoritmos basados en los parámetros de color (Mapa Térmico) y Evolución de la imagen termográfica. Las herramientas en general a utilizar están compuestas por un computador personal convencional (PC) y la plataforma técnica de programación MATLAB®.

2. MÉTODO

Este trabajo fue realizado en la plataforma Matlab y las imágenes termográficas se encuentran alojadas en la web por Visual Lab-DMR [14], Las imágenes analizadas son tomadas bajo la paleta de color arcoíris. El desarrollo de esta investigación se compuso de tres fases:

1. Caracterización de lesiones de cáncer de mama.
2. Pruebas en imágenes termográfica mamaria
3. Desarrollo de herramienta informática para el prediagnóstico de cáncer de mama.

La caracterización de lesiones de cáncer de mama mediante algoritmo realizado tenía como objetivo identificar a través del mapa térmico variaciones en la temperatura de la mama que indicarían presencia o ausencia de cáncer o alguna anomalía. Teniendo en cuenta que las zonas rojas en las imágenes indican la presencia de temperaturas mayores a la máxima normal, se buscó seleccionar estas zonas dado que son indicio de una anomalía. Luego, las imágenes se examinaron mediante algoritmos de selección de región de interés y agrupamientos por K-means; utilizado para segmentar colores con el objetivo de establecer validez de conclusiones de otros autores y realizar análisis propios del mapa térmico mediante el uso de histogramas. Las etapas de este proceso fueron organizadas en un diagrama para una mejor comprensión (Figura 1).

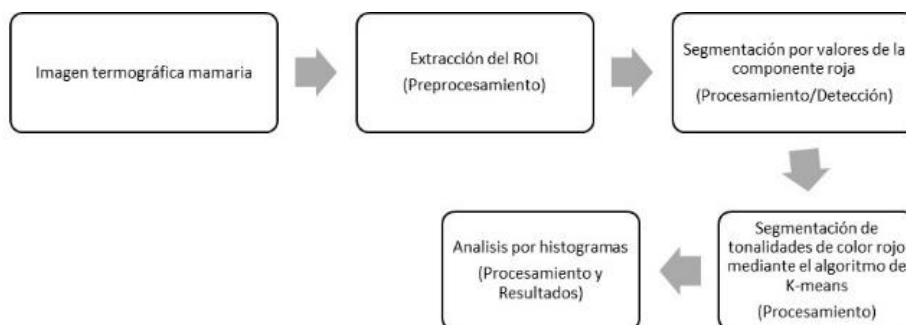


Figura 1. Etapas de la caracterización de cáncer de mama

2.1 Adquisición de la imagen termográfica

Las imágenes de lesiones fueron tomadas de una base de imágenes termográficas disponible en la web para estudiantes, investigadores o cualquier persona interesada en colaborar en el área de la termografía [14]. Debido a que las cámaras termográficas con características adecuadas en términos de resolución gráfica térmica poseen precios comerciales superiores a veinte millones de pesos colombianos no fue posible crear una base de imágenes propia. Se debe tener en cuenta que las imágenes termográficas a examinar deben ser adquiridas bajo la paleta arcoíris y configurando el rango de medidas de temperatura de tal manera que los valores por encima de 30° C sean representados bajo el color rojo [15], dado que el rango normal de temperatura en la parte del tórax está entre 29. 5° C y 30. 5° C [16].

2.2 Elaboración de la base de imágenes termográficas

Dado que la base de imágenes proporcionada por Visual Lab-DMR (base de imágenes termográficas disponible en la web) [14], contiene más de 100 imágenes y no todas son aptas para el procesamiento a realizar con el algoritmo diseñado en este trabajo, se escogieron 8 imágenes de pacientes enfermos (Figura 2) y 8 imágenes de pacientes sanos (Figura 3), para realizar el respectivo análisis y caracterización. Cabe resaltar que el sitio web proporciona datos del paciente tales como edad, raza, enfermedades que padece, diagnóstico por mamografía clasificado como sano o enfermo, malos hábitos, entre otras características que son importantes a la hora de dar un diagnóstico o hacer un seguimiento médico.

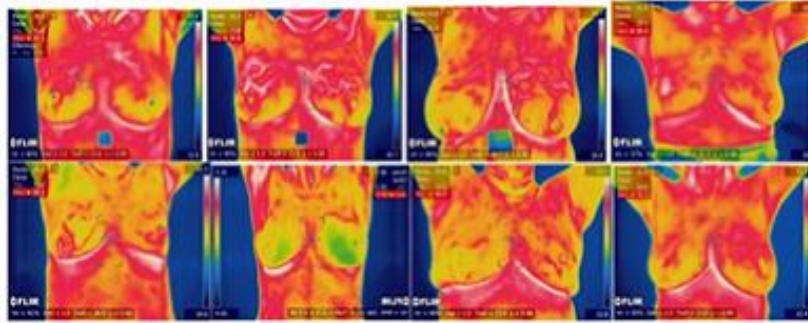


Figura 2. Imágenes termográficas de pacientes enfermos

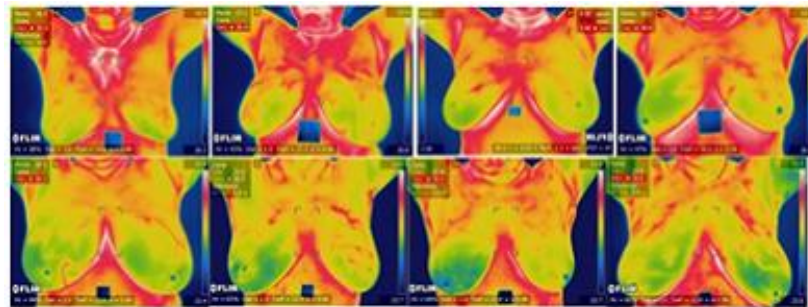


Figura 3. Imágenes termográficas de pacientes sanos

2.3 Caracterización de cáncer de mama

La interfaz de computadora permite cargar cualquier tipo de imagen termográfica en formato de imagen a excepción del formato radiométrico de imágenes termográficas is2. Dado que muchas veces en las imágenes termográficas aparecen elementos que no son de interés o que pueden generar falsos positivos, la interfaz permite el recorte en la imagen de la zona deseada para el estudio (Figura 4). La figura 4A muestra una imagen termográfica cortesía de Visual Lab-DMR [14]. La selección manual es realizada como puede observarse en la figura 4B, y finalmente se recorta la imagen original según esta selección (Figura 4C).

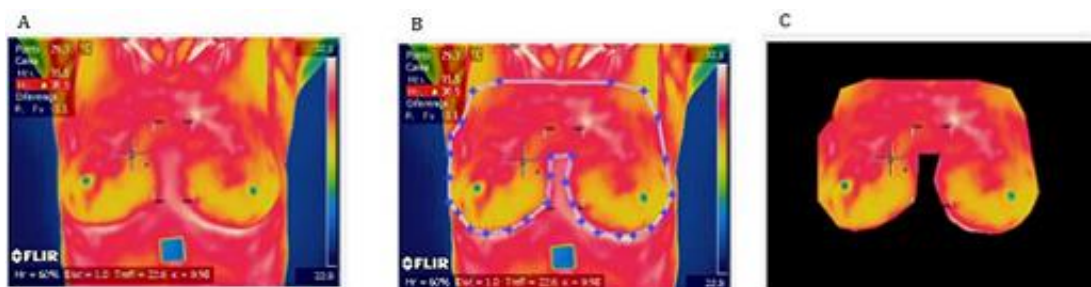


Figura 4. Termografía de un paciente con cáncer de mama (A), Selección manual de la región de interés (ROI) (B), Recorte realizado en la termografía siguiendo la selección del usuario (C)

2.4 Segmentación por valores de la componente roja

En vista que las lesiones con cáncer de mama, debido al protocolo de adquisición, exhiben colores rojos en las termografías se segmenta en base a los valores existentes de componentes roja. Mediante el análisis de los histogramas de varias imágenes termográficas tanto de pacientes sanos como de enfermos se pudo observar que los valores de la componente roja en pacientes enfermos se encuentran por encima de 129, esta característica fue observada mediante el uso de histogramas (Figura 5), la componente roja empieza a mostrar valores mínimos a partir de 128 y en algunas imágenes en 130, y valores más altos en el rango de 234 a 235.

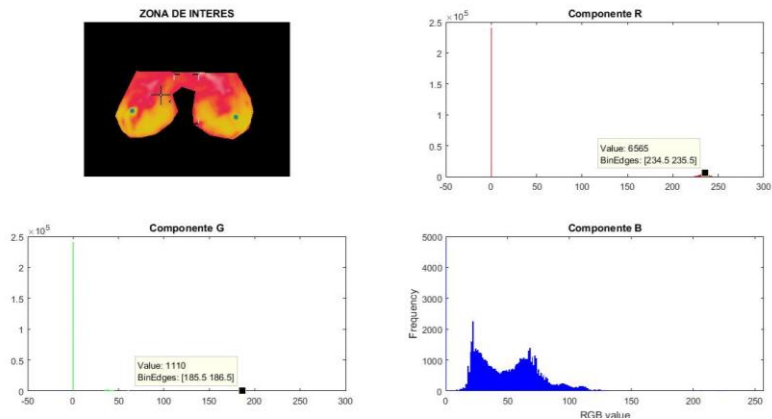


Figura 5. Histograma de las componentes roja, verde y azul de la región de interés

2.5 Segmentación de tonalidades de color rojo mediante el algoritmo de K-means

Buscando realizar una caracterización de las lesiones mamarias por medio de patrones repetitivos como bordes, o por rango de valores como se mostró en el histograma, se realizaron algunos algoritmos que, aunque no arrojaron los resultados esperados sirvieron para descartar métodos de detección. En el caso de detección de bordes se utilizaron los métodos de Canny, Sobel (Figura 6A), Prewitt y Roberts (Figura 6B).

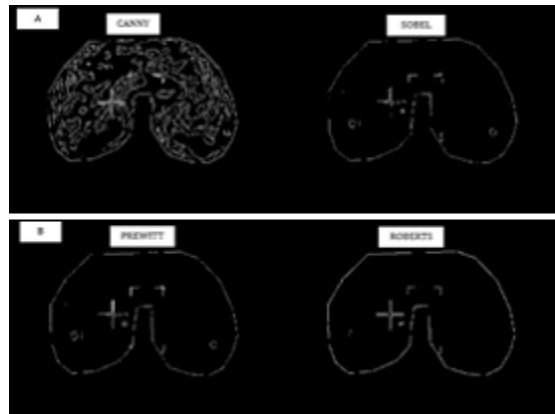


Figura 6. Detección de bordes por los algoritmos de Canny y Sobel (A), Detección de bordes con Prewitt y Roberts (B)

Algunos autores en sus investigaciones han concluido que el algoritmo de Canny resulta ser muy eficiente en la detección de bordes, y en este caso no es la excepción como se puede apreciar en las imágenes mostradas. Sin embargo, luego de aplicar este algoritmo a varias imágenes termográficas se pudo concluir que en este tipo de lesiones no se evidencia un patrón que se pueda tomar como repetitivo en las imágenes, por lo cual se procedió a realizar la segmentación usando el algoritmo de Clustering K-means. Primero se realizó una segmentación de las tonalidades de color rojo en aras de establecer parámetros de discriminación según los valores de las componentes de colores de la imagen (Figura 7).

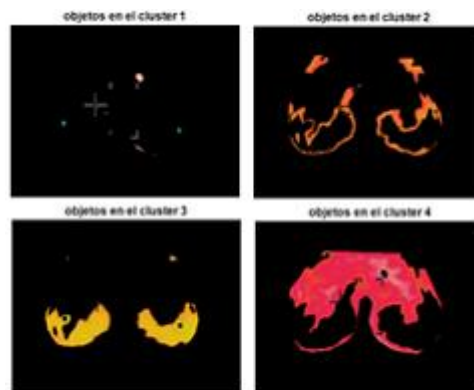


Figura 7. Agrupamiento de colores con K-means en imagen termográfica

La imagen obtenida en la segmentación por valores de la componente roja se toma como entrada para el algoritmo de K-means tras cambiar su espacio de color a CIE L^*a^*b . El objetivo es dividir la imagen en cuatro según el promedio de los valores de sus componentes a y b. En este estadio del proceso, una de las imágenes obtenidas en la segmentación

contiene a la zona con mayor valor de la componente roja o en su defecto la lesión de cáncer de mama. La implementación del algoritmo de K-means se realizó utilizando el código ejemplo de MatLab para segmentación de color por agrupamiento, K-means [17]. Con este proceso aun no es posible saber si la termografía en cuestión pertenece al grupo de enfermos o de sanos, para lo cual se extrae solo la componente roja que es la que verdaderamente interesa analizar, dado que en esta es donde se evidencian las temperaturas más altas (Figura 8).

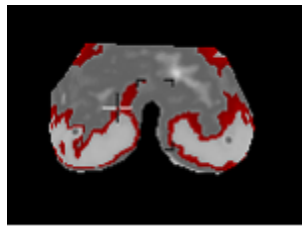


Figura 8. Componente roja mostrada en imagen en escala de grises

En base a esta imagen, se realiza una comparación de los valores contenidos en la componente roja, y en el algoritmo se indica que ahora se muestren solo los valores que están por encima de 129. Con esto ya es posible saber si la imagen corresponde a un paciente sano o enfermo. Si se muestran algunos valores rojos sobre la imagen en escala de grises indica que la imagen es de un paciente enfermo (Figura 9), de lo contrario, si queda solo en escala de grises esta pertenece a un paciente sano.

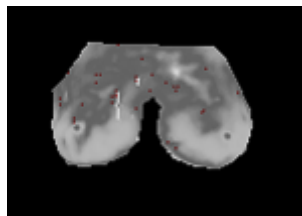


Figura 9. Imagen final de la segmentación por k-means

3. RESULTADOS

3.1 Desarrollo de herramienta informática para el prediagnóstico de cáncer de mama

La interfaz diseñada permite la adquisición de la imagen desde el computador con el botón cargar imagen, la selección manual del área de estudio o región de interés (Figura 10), mediante los botones selección de ROI y Recorte del panel (Figura 11).

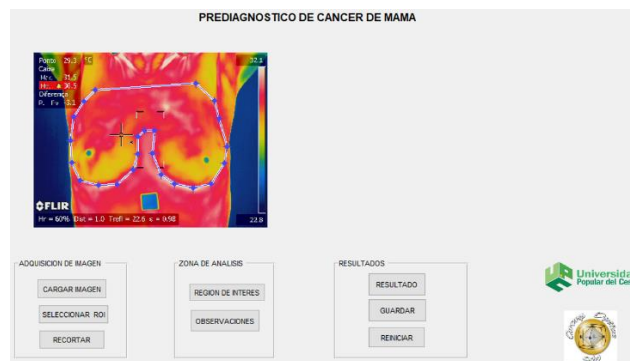


Figura 10. Selección de región de interés (ROI)

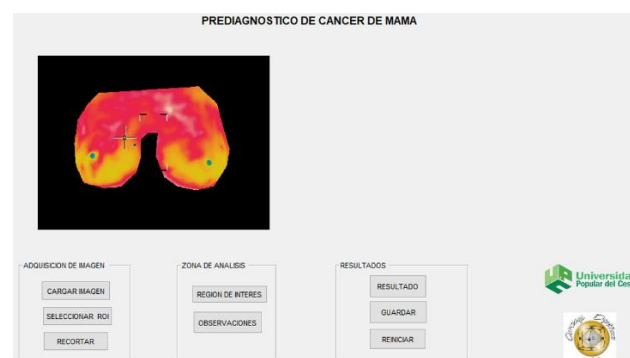


Figura 11. Recorte de región de interés

Luego se procesa la imagen tomando únicamente las zonas del área de estudio que presenten componentes rojas, y se muestra este proceso con el botón de región de interés (Figura 12).

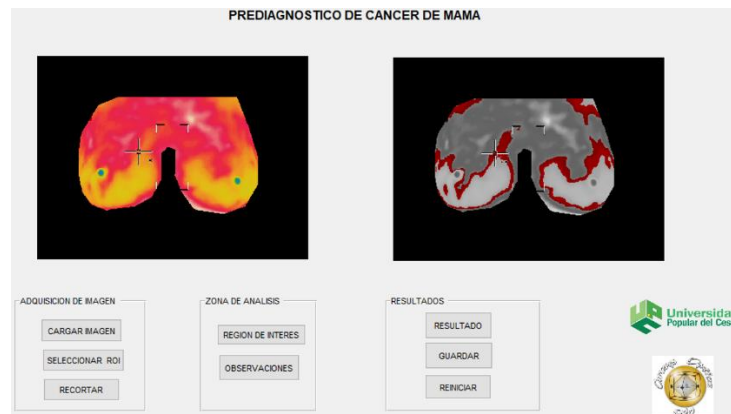


Figura 12. Imagen recortada con la región de interés

Finalmente, al pulsar el botón Resultados, el software segmenta la imagen, tomando aquellas zonas cuyos valores presenten un mayor promedio de valores de color rojo. Identificando así el tipo de termografía que se está analizando sea enferma o sana (Figura 13).

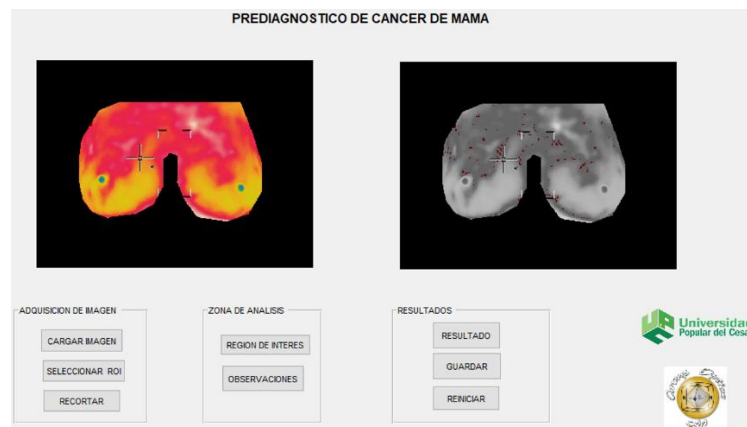


Figura 13. Imagen final con resultado de cáncer de mama (Enfermo)

3.2 Pruebas en pacientes sanos

El software fue probado en 10 imágenes de pacientes sanos, para evitar extendernos demasiado se mostrarán a continuación los resultados de dos termografías de pacientes con diagnóstico sano en la base de imágenes Visual Lab-DMR. La interfaz para el caso de pacientes sano debe mostrar la imagen final totalmente gris como se aprecia en la Figura 13.

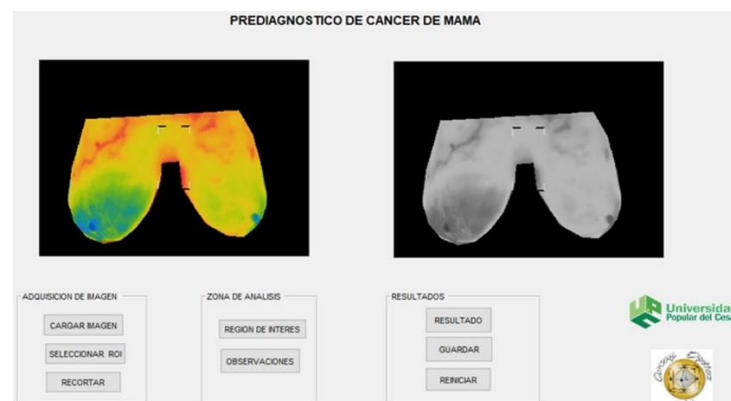


Figura 13. Detecciones en imágenes termográficas de pacientes con diagnóstico sano y resultado de termografía sana

En algunos casos es posible que el resultado sea diferente, es decir, la imagen final arroje una mínima cantidad de puntos rojos sobre la imagen (Figura 14). Esto puede deberse a errores en la adquisición de la imagen o a un signo de alerta al que debe hacerse seguimiento. Como las imágenes son de cortesía no es posible saber la causa exacta de esta variación en el resultado final.

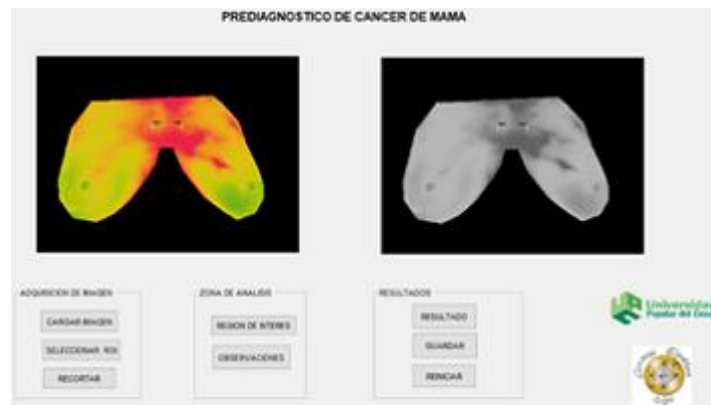


Figura 14. Resultado de termografía con sospecha de cáncer de mama

3.3 Pruebas en pacientes enfermos

Para el caso de los pacientes con diagnóstico enfermos se realizaron pruebas en 10 termografías mamarias, pero solo se mostrarán 2 resultados. La interfaz debe arrojar en la imagen final gris algunos puntos que indican que la temperatura sobrepasa la normal en esa zona, por lo que se considera que existe una anomalía (Figura 15).

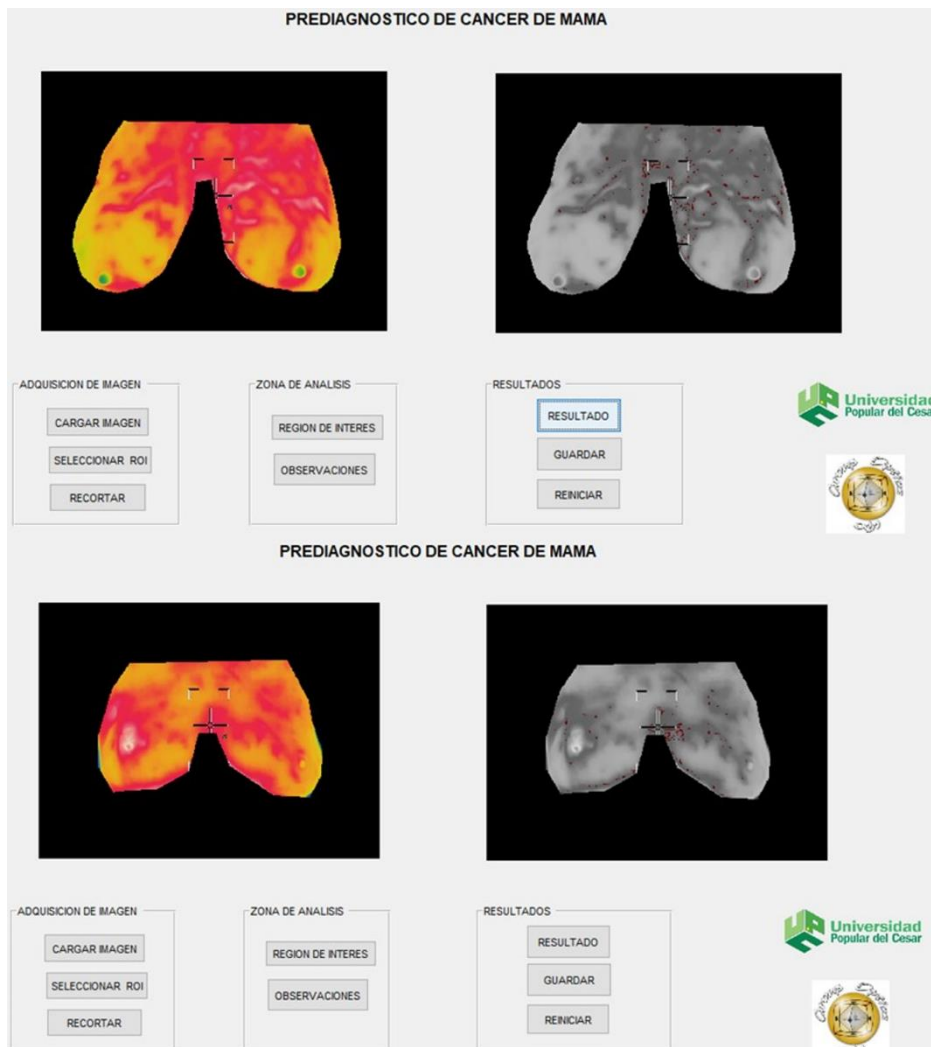


Figura 15. Detecciones en imágenes termográficas de pacientes con diagnóstico enfermo y Termografía mamaria con resultado de cáncer de mama

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que el análisis de termografías mamarias utilizando técnicas de procesamiento de imágenes tales como segmentación por agrupación de colores y análisis de histogramas; arrojaron información significativa que sirvieron para caracterizar dichas imágenes de esta manera diseñar una herramienta digital de gran ayuda para la detección temprana de cáncer de mama; cabe resaltar, que este trabajo en

ningún momento busca sustituir la valoración del especialista en salud de esta área, sino que por el contrario, lo que se busca es que esta sea un apoyo para ellos al momento de dar un diagnóstico a sus pacientes. Se debe tener en cuenta que la temperatura normal de los senos es el factor principal en este método de pre diagnóstico, pero pueden presentarse alteraciones por factores externos que influyen en los resultados, tales como errores en el protocolo de adquisición. Con esta herramienta, también es posible saber si un paciente debe llevar un seguimiento continuo por sospechas de anomalías en la zona mamaria.

5. CONCLUSIONES

En este capítulo se demostró que las termografías mamarias presentan valores en la componente roja superiores a 129 bajo el espacio de color RGB en una escala de 0 a 255. Así mismo, al segmentar una termografía que contenga un carcinoma del tipo especificado al inicio del trabajo, la zona que contiene la lesión posee un mayor promedio de valores en la componente roja con respecto a las demás áreas.

Cabe resaltar que todos estos hechos son válidos para imágenes termográficas adquiridas mediante el uso de la paleta arcoíris y de la selección adecuada del rango de medida de temperatura. Aun son necesarias pruebas con imágenes termográficas de Angiosarcoma y cáncer de seno inflamatorio que son menos comunes, esto para validar si el software es capaz de pre diagnosticar su presencia.

Por medio de esta investigación fue posible la creación de un software para el prediagnóstico de cáncer de mama, es importante resaltar la vital importancia de las configuraciones de la cámara termográfica usada para la adquisición de imágenes de lesiones en la detección a través del software.

REFERENCIAS

- [1] S. Robles, y E. Galanis, "El cáncer de mama en América Latina y el Caribe". *Revista panamericana de salud pública*, vol 12, No 2, p.141-143, (2002).
- [2] El universal, "2.600 mujeres en Colombia mueren al año de cáncer de seno", *www.eluniversal.com.co*, (2018). [En línea]. Disponible en: <https://www.eluniversal.com.co/salud/2600-mujeres-en-colombia-mueren-al-ano-de-cancer-de-seno-208783-0SEU311258>.
- [3] H. Ogiwara, Y. Hamamoto, Y. Fujita, A. Goto, J. Nishikawa, I. Sakaida, "Development of a Gastric Cancer Diagnostic Support System with a Pattern Recognition Method Using a Hyperspectral Camera", *J. Sens*, (2016).
- [4] T. Lehmann, M. Tavakoli, N. Usmani, R. Sloboda, "Force-sensor-based estimation of needle tip deflection in brachytherapy", *J. Sens*, doi:10.1155/2013/263153, (2013).
- [5] M. Gautherie, C. Gros, "Breast thermography and cancer risk prediction", *Cancer 1980*, Vol 45, p. 51-56, (2016)
- [6] S. Bagavathiappan, J. Philip, T. Jayakumar, B. Raj, P. Rao, M. Varalakshmi, V. Mohan, "Correlation between plantar foot temperature and diabetic neuropathy by using an infrared thermal imaging technique," *Journal of Diabetes Science and Technology*, Vol 4, p.1386-1392, (2010).
- [7] R. Lawson, "Implications of surface temperatures in the diagnosis of breast cancer", *Can. Med. Assoc. J.* vol 75, p. 309-310, (1956).
- [8] E. Ng, Y. Chen, y L. Ung, "Computerized breast thermography: Study of image segmentation and temperature cyclic variations", *J. Med. Eng. Technol*, Vol 25, p. 12-16, (2001)
- [9] C. Herry, M. Frize, "Digital processing techniques for the assessment of pain with infrared thermal imaging" *In Proceedings of the Second Joint EMBS-BMES Conference: 24th Annual Conference of the Engineering in Medicine and Biology and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society, Houston*, Vol 2, p. 1157-1158, October 2002.
- [10] G. Schaefer, M. Závisek, y T. Nakashima, "Thermography based breast cancer analysis using statistical features and fuzzy classification", *Pattern Recognit*, Vol 42, p. 1133-1137, (2002)
- [11] K. Prasad, K. Rajagopal, "Segmentation of Breast Thermogram Images for the Detection of Breast Cancer", *A Projection Profile Approach. J. Image Graph*, Vol 3, p. 47-51, (2015)
- [12] M. Garduño, S. Vega, L. Morales y R. Osornio, "Supportive Noninvasive Tool for the Diagnosis of Breast Cancer Using a Thermographic Camera as Sensor", *Sensors*, Vol 17, p. 1-21, (2017).
- [13] A. Rajendra, E. Ng, T. Jen-Hong, S. Vinitha, "Thermography Based Breast Cancer Detection Using Texture Features and Support Vector Machine", *Journal of Medical Systems*, Vol 36, p. 1503-1510, (2012).
- [14] Visual Lab-DMR, "Banco de imágenes mastológicas", (2012) [en línea]. Disponible en: <http://visual.ic.uff.br/dmi/prontuario/home.php> [Accedido el 01 de febrero de 2019]
- [15] C. Herman, "Emerging technologies for the detection of melanoma: achieving better outcomes", *CCID*, Vol 5, p. 195-212, (2012).
- [16] J. Verduzco y W. Cetina, "Vista de Sistema de monitoreo de temperatura de los senos humanos en la detección temprana del cáncer de seno", *RICS Revista Iberoamericana de las Ciencias de la Salud*, [2015]. [Documento en línea]. Disponible: <https://www.rics.org.mx/index.php/RICS/article/view/24/51>, [accedido el 2 de marzo de 2019]
- [17] MathWorks, "Segmentación basada en color mediante clustering K-means - MATLAB & Simulink Example", *MathWorks América Latina*, [2019]. [Documento en línea]. Disponible: https://la.mathworks.com/help/images/examples/color-based-segmentation-using-k-means-clustering.html?searchHighlight=kmeans&s_tid=doc_srchtile. [Accedido el 20 de marzo de 2019].

Implementación de tecnologías basadas en Inteligencia Artificial para el análisis de la conducta de robots móviles autónomos en espacios de configuración en colisión

Alejandro Armando H.¹

Emanuel Maximiliano A.²

Universidad Tecnológica Nacional – Argentina

La tecnología de la Inteligencia Artificial (IA) concatena una diversa gama de tecnologías transversales a diferentes campos disciplinares. Este es el caso de la navegación de robots móviles autónomos cuando deben realizar tareas de diferente complejidad en un ambiente estructurado. Esta producción centra su trabajo en la conducta que registran los robots móviles en ambientes de navegación en espacios de configuración en colisión, en los cuales las estructuras permanecen fijas mientras el robot realiza las operaciones requeridas por el usuario. Los primeros experimentos tuvieron como soporte la aplicación de las Tecnologías Inteligentes de las Redes Neuronales Artificiales (RNA), los cuales se entraron en la implementación del algoritmo de aprendizaje supervisado de retropropagación del error (*backpropagation*). Actualmente, y con el propósito de mejorar la performance del robot móvil con la tecnología aplicada, se realizan experimentos mediante la aplicación de algoritmos inteligentes de paradigma deliberativo, los cuales se orientan hacia la planificación de las tareas que el robot debe realizar dentro de su entorno de operación.

1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones en el campo de la robótica se realizaban en base a ambientes de desarrollo con células de trabajo fijas en sus posiciones para que el robot desarrolle sus tareas, tal es el caso del robot ensamblador o soldador en una planta de montaje. Tan significativos fueron los avances tecnológicos en los diferentes ambientes industriales, que constituyeron una de las razones principales para dotar a los sistemas de robots de una adecuada capacidad de desplazamiento, más allá de las prestaciones que realizaban en sus celdas de trabajo. Es entonces cuando esta disciplina dio en llamarse “robótica móvil” y constituye uno de los mayores desafíos que aborda la comunidad científica, que trabaja dentro del rico y extenso campo de la robótica. Cabe señalar, que las sucesivas investigaciones desarrolladas intentaron proporcionar a estos sistemas móviles de un nivel de autonomía suficiente, que le permitan navegar en su ambiente de operación y reaccionar ante situaciones que no han sido consideradas en su programa de control [1]. La navegación permite guiar el curso de un robot móvil mediante un entorno en el que se encuentran obstáculos. Se conocen diferentes esquemas para llevar a cabo esta tarea, pero todos ellos tienen el objetivo común de dirigir el vehículo hacia su destino de la manera más segura y eficiente posible. La capacidad de reacción que pueda poseer el robot cuando se encuentra ante situaciones inesperadas, debe constituir su cualidad más distintiva para desenvolverse eficazmente en el entorno donde éste deba operar, lo cual indica el grado de autonomía que este posee.

En la primera etapa de este trabajo se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de técnicas de navegación robótica basadas en redes neuronales con aprendizaje supervisado de tipo *backpropagation*, representativo de las características más potentes del paradigma reactivo concerniente a la navegación autónoma de robots [2], [3]. Este trabajo se realiza en un marco un poco más amplio considerado una evolución del paradigma reactivo, que se denomina “Aproximación Basada en Comportamientos” [4]. Esto es, los comportamientos describen la forma en que se reacciona (en este caso un sistema robótico) ante un determinado estado de sensores y donde las actuaciones se determinan de manera más elaborada que una simple consulta a una tabla de correspondencias, realizando cálculos a los efectos de decidir qué acción se debe llevar a cabo. En la segunda etapa de este trabajo se hace uso de los Algoritmos de Búsqueda, los que constituyen una de las tecnologías más importantes de la IA, cuyo objetivo principal consiste en hallar una solución válida dentro del espacio de estados. Entre otras técnicas que se pueden implementar con estos algoritmos se conocen las de búsqueda no informada y búsqueda con información. La primera debe su denominación a que el problema que se pretende resolver no proporciona ninguna información adicional que sirva de soporte para encontrar una solución de forma más rápida. En tanto que la segunda técnica sí proporciona información que ayuda a guiar la búsqueda.

En este trabajo se utilizan técnicas de búsqueda no informada, o también conocida como búsqueda a ciegas. En primer lugar, se muestra un experimento relacionado con la Técnica de búsqueda en profundidad, cuyo objetivo central es encontrar una ruta entre el nodo raíz y el nodo objetivo; en segundo término, se hace uso de la técnica de búsqueda en amplitud, la cual además de hallar una ruta entre el nodo raíz y el nodo objetivo, encuentra la más corta. Cabe destacar a tal efecto, que tanto el entorno estructurado como el nodo raíz y destino son los mismos a la hora de implementar ambas técnicas, a fin de poder medir la performance de cada uno de ellos.

2. MÉTODO

El modelo propuesto se desarrolla en tres secciones: en la sección 2.1 se menciona brevemente el abordaje de la navegación robótica con aprendizaje supervisado mediante la aplicación de RNA de tipo *backpropagation*; en la sección 2.2, se desarrolla el modelo de navegación robótica con algoritmos de búsqueda, en la subsección 2.2.1 se

¹ alejandrohossian@yahoo.com.ar

² maximilianoalveal@hotmail.com

aborda el algoritmo de búsqueda en profundidad y en la subsección 2.2.2 se analiza el mismo problema propuesto en la subsección anterior esta vez mediante la aplicación de algoritmos de búsqueda en amplitud.

2.1 Aplicación de una Red de tipo *Backpropagation*

A efectos de estudiar la conducta de un robot, se propone como arquitectura una red neuronal que consta de una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida [5]. De esta manera, se intenta que el robot pueda realizar trayectorias de mayor complejidad que para las que fue entrenado. Durante el proceso de entrenamiento, el vehículo robótico recibe información del ambiente en el cual navega; la cual es volcada en un mapa sensor – motor, que permite esquematizar tal ambiente con obstáculos definidos, y a través de un software diseñado a tal efecto, se simula su interacción luego de su entrenamiento para evaluar su performance bajo las premisas del paradigma reactivo. Este mapa sensor-motor se traduce en una matriz con la descripción sensorial en cada posición de la grilla, que representa el entorno y los posibles movimientos en respuesta a los estímulos sentidos, conforme a las políticas de proximidad y de movimiento [6].

Considerando el mapa sensor-motor y tras el entrenamiento del robot con la tecnología inteligente de la red neuronal escogida se evalúa el robot para diferentes ambientes de operación. La combinación de rutas definidas para distintas configuraciones del ambiente de navegación, constituyen las diversas conductas de navegación que exhibe el robot [7]. El paradigma de red utilizado se describe en la Figura 1, mientras que las Figura 2 y 3 muestran el esquema de la organización del ambiente donde navega el robot, consistente en una grilla cuyas coordenadas (x, y) se encuadran dentro de un eje cartesiano con dos trayectorias diferentes.

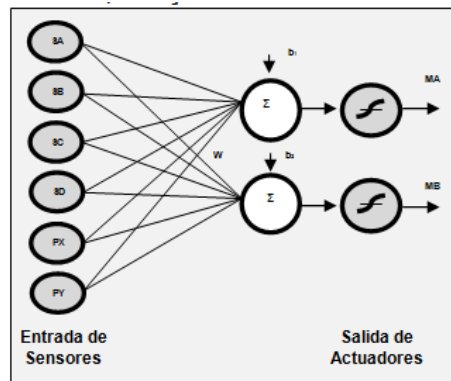


Figura 1. Arquitectura de red de tipo *Backpropagation*

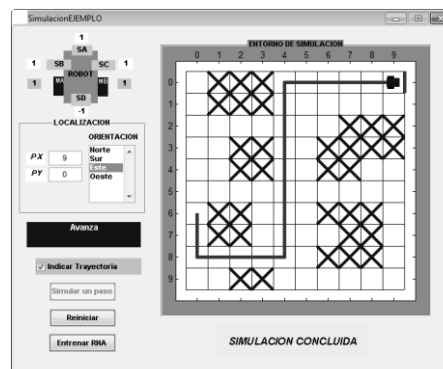


Figura 2. Trayectoria exitosa de un robot entrenado con RNA

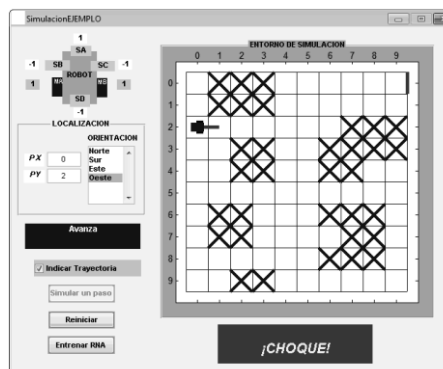


Figura 3. Trayectoria no exitosa partiendo desde un lugar distinto al aprendido

Este entorno visual brinda la información referida a la localización del robot (proporcionada por las coordenadas X e Y, que en este caso corresponden a 0 según X y a 6 según Y), su orientación (dada por Norte, Sur, Este y Oeste), el ambiente propiamente dicho, con la ubicación de sus obstáculos (casilleros con cruces) y las opciones para entrenar la red, reiniciar el proceso cuando sea necesario y simular los pasos de la trayectoria seguida por el robot. Asimismo, estas últimas dos figuras muestran tanto una trayectoria exitosa y una colisión para el mismo entorno partiendo desde otro origen [8]. En fase de operación, se procede a presentarle al robot otras trayectorias diferentes a las aprendidas para evaluar su performance.

2.2 Modelo de aplicación de algoritmo de búsqueda

El uso de grafos de navegación permite trabajar con una abstracción del entorno real y son estos usados en la navegación robótica cuando se conocen previamente las características del ambiente. El entorno se expresa en una grilla donde los casilleros oscuros representan los obstáculos y los casilleros libres indican el espacio transitable, tal como se observa en la Figura 4. En estos espacios libres se colocan nodos o vértices nombrados con letras mayúsculas, como se muestra en la Figura 5, para luego trazar las aristas posibles que los conectan, Figura 6.

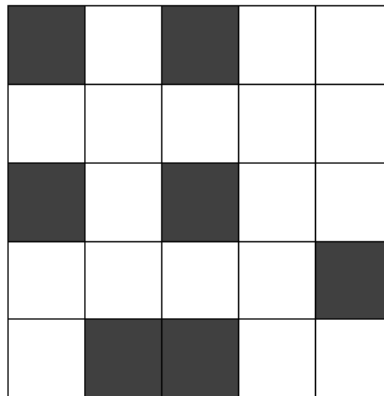


Figura 4. Entorno propuesto

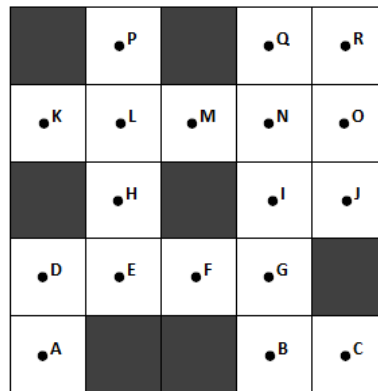


Figura 5. Distribución de los nodos

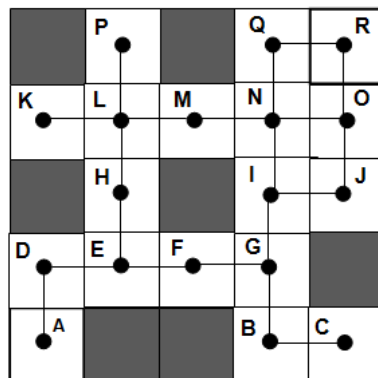


Figura 6. Diseño del grafo en el entorno

En este caso de estudio se utiliza un grafo que cuenta con dieciocho vértices o nodos y veinte aristas. Se conoce como grafo de navegación o navgraph y permite trabajar con una abstracción de robots cuando se conoce previamente las características del entorno [9]. Con la definición de estos elementos, se puede entonces comenzar con la presentación

de los modelos de algoritmos propuestos. Es importante señalar que estos algoritmos trabajan con cierta información. Es decir, el algoritmo aplicado conocerá cuál es el nodo objetivo al que se desea llegar y también puede guardar información sobre cuáles nodos y aristas se han visitado previamente.

2.2.1 Modelo de aplicación de algoritmo de búsqueda en profundidad

El algoritmo Depth First Search (DFS) o algoritmo de búsqueda en profundidad, es el primer algoritmo que se analiza. La búsqueda que realiza este algoritmo consiste en el descenso hasta el máximo nivel de profundidad de la rama llegando hasta al nodo más profundo y luego continuar con la siguiente rama. Este algoritmo se inicia en un nodo del grafo, considerado nodo raíz. A partir de ese punto, observa cuáles son los nodos hijo y visita al primero. De este nuevo nodo, ve cuáles son los hijos y visita al primero que encuentra. El proceso sigue hasta hallar a una hoja, es decir, un nodo que no tenga hijos o a uno que esté conectado a nodos que ya se hayan visitado previamente. En ese momento, regresa al nodo padre inmediato y visita al siguiente hijo del nodo. El proceso continúa hasta que se encuentra el nodo objetivo o se han visitado todos los nodos del grafo. Esto puede observarse detenidamente en el diagrama de flujo que se despliega en la Figura 7.

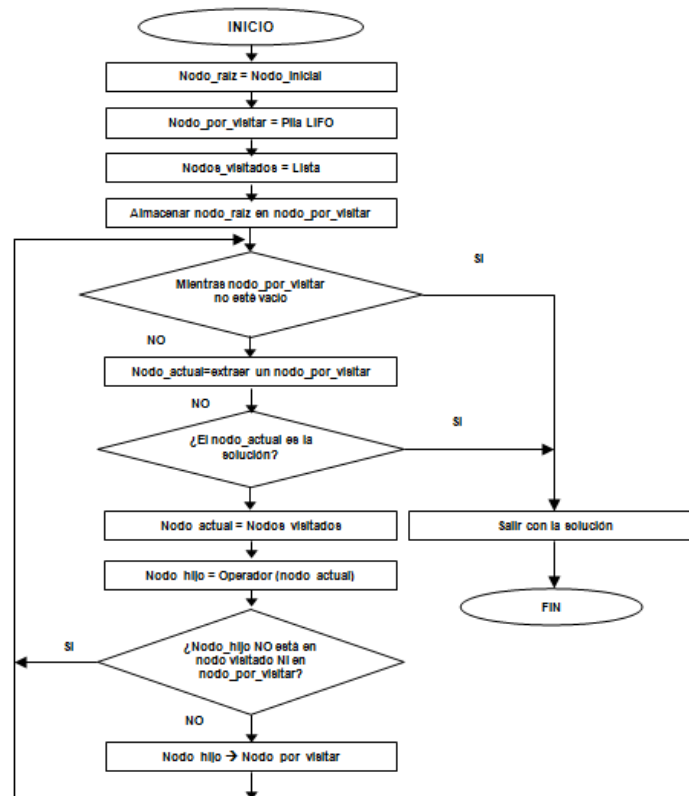


Figura 7. Diseño del grafo en el entorno

Este algoritmo expresado en el pseudocódigo descrito en la Figura 8 garantiza encontrar una ruta entre el nodo raíz y el objetivo, siempre y cuando el nodo objetivo exista y esté conectado al grafo.

```

    INICIO
    Inicializar.Nodo_raiz = estado_inicial
    Inicializar.Nodo_por_visitar = Pila LIFO
    Inicializar.Nodos_visitados = Lista
    Almacenar.nodo_raiz en.nodo_por_visitar
    Mientras que.nodo_por_visitar no esté vacío
        Node_actual = extraer.un.nodo_por_visitar
        Si node_actual == solución entonces
            Salir con solución
            Terminar
        Caso contrario
            Introducir el.nodo_actual en.nodos_visitados
            Hacer por cada operador
                Actualizar.Nodo_hijo = operador (nodo_actual)
                Si el.nodo_hijo no está en.nodos_visitados ni.nodo_por_visitar entonces
                    Introducir.nodo_hijo en.nodo_por_visitar
            Volver a Mientras...
    FIN
  
```

Figura 8. Pseudocódigo del Algoritmo de Búsqueda en Profundidad

Desde el punto de vista de la implementación, la búsqueda en profundidad utiliza una pila LIFO (Last In First Out). Una pila LIFO tiene dos operaciones: una para introducir un dato en la pila y otra para extraer un dato de la pila. El dato que se extrae de la pila es el último que se introdujo. Por todo lo expuesto precedentemente, el ejemplo propuesto tiene como objetivo que el robot parta del nodo A y llegue al nodo R, es decir que encuentre una ruta que pueda seguir. Pero ello es necesario contar con una pila o *stack* que sea capaz de guardar las aristas que faltan por visitar y, además, un arreglo en el que se registren los nodos y su nodo padre. Es importante al iniciar este algoritmo, hacer una arista del nodo raíz a sí mismo para poder iniciar y colocarlo en la pila. Esto se ilustra en la Figura 9.

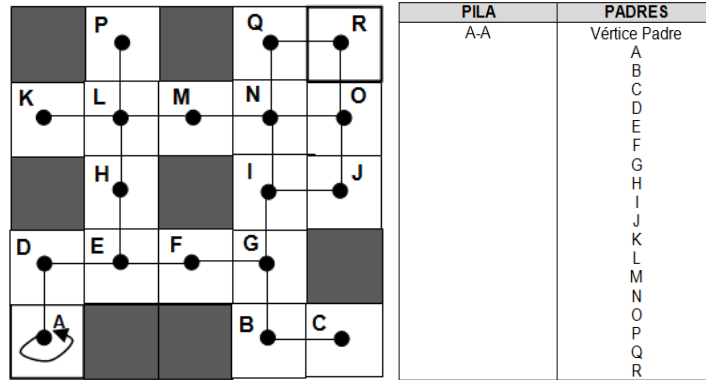


Figura 9. Grafo propuesto con un autolazo en el nodo A a fin de dar inicio al algoritmo

Se toma la primera arista que se encuentra en pila. Este lleva al nodo con el que se trabajará. Apenas se llega a este nuevo nodo se registra quiénes son sus nodos padres, marcando el nodo actual como ya visitado. Luego se verifica si el nodo actual es el objetivo. Si lo es, finaliza el algoritmo, de lo contrario se continúa y se coloca en el registro de pila las aristas que se inician a partir del nodo actual. Si alguna arista ya estuviera previamente visitada, no se coloca. Esto se observa en la figura anterior y se registra nuevamente como sigue en la Figura 10.

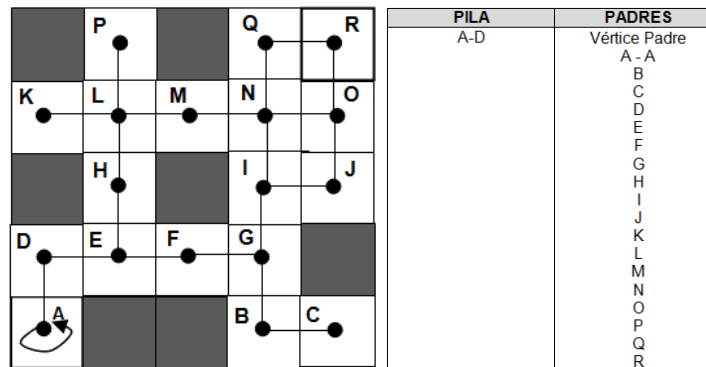


Figura 10. Grafo propuesto con el registro de las aristas adyacentes al nodo A

En el siguiente paso se toma la primera arista de la pila y de esta manera el robot se posiciona en el nodo D. Se verifica que este nodo no sea el nodo destino. Su padre es el nodo A y se continúa con los pasos del algoritmo de la manera que se ilustra en la Figura 11.

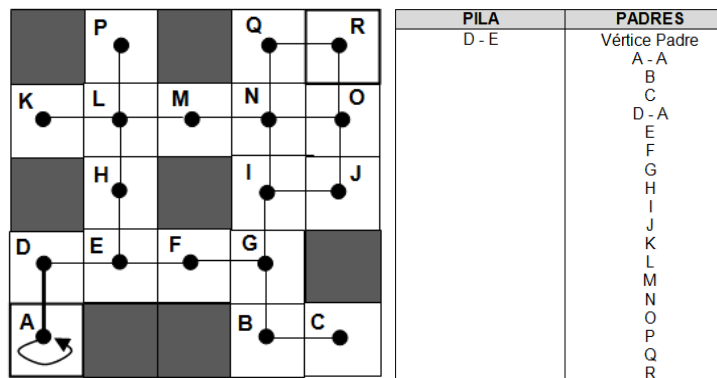


Figura 11. El robot se posiciona en el nodo D. Se registra en la tabla a su nodo padre que es A

Entonces, se toma la primera arista de la pila y de esta manera el robot se posiciona en el nodo E. Su padre es el nodo D y se continúa con los pasos del algoritmo de la manera que se ilustra en la Figura 12. Se observa que desde E se desprenden las aristas E-H y E-F.

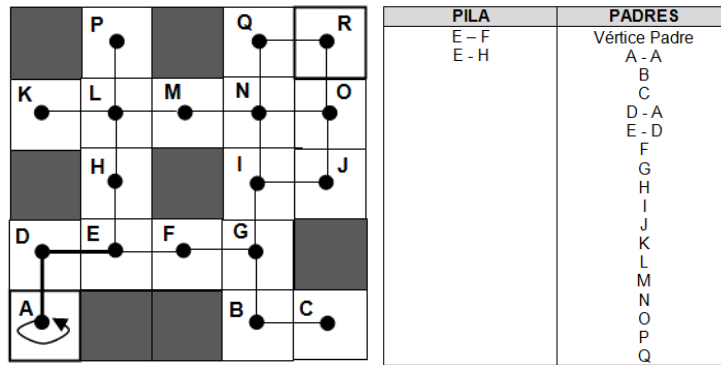


Figura 12. El robot se posiciona en el nodo E. Se registra en la tabla a su nodo padre que es D

Se escoge recorrer la arista que se encuentra primero en la pila, es decir E-F y de esta forma el robot puede posicionarse en el nodo F. Ahora bien, el vértice E es el padre de F y la arista posible de ser recorrida es la arista F-G. Observe la Figura 13.

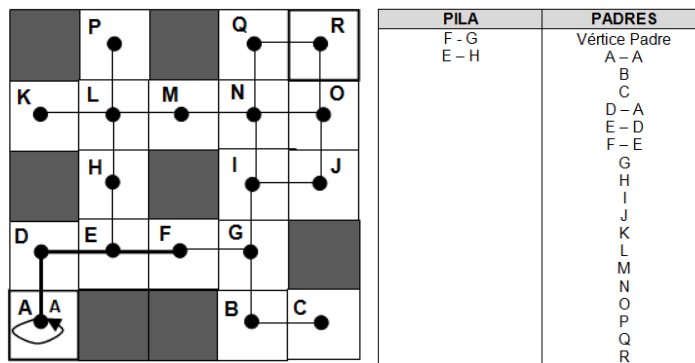


Figura 13. El robot se posiciona en el nodo F. Se registra en la tabla a su nodo padre que es E

Siguiendo esta línea, el vehículo robótico llega al nodo G. Se actualiza nuevamente la pila y el registro de los nodos padres. Tal como se observa en la Figura 14.

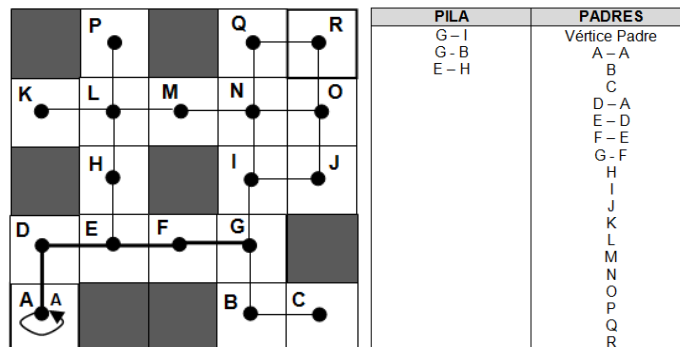


Figura 14. El robot se posiciona en el nodo G. Se registra en la tabla a su nodo padre que es F

Se escoge la arista G-I, que es la primera en la pila y se guarda en ella las aristas que aún quedan pendientes por recorrer. Como en el paso anterior se registran los nodos padres. De esta manera el robot continúa hacia el nodo I, como se indica en la Figura 15.

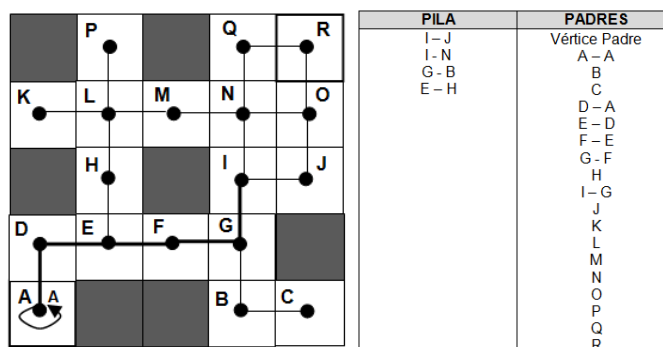


Figura 15. El robot se posiciona en el nodo I. Se registra en la tabla a su nodo padre que es J

Desde el vértice I, y con el objeto de ilustrar esta aplicación, se recorre hasta el vértice J. Se actualizan entonces los registros tal como se observa en la Figura 16.

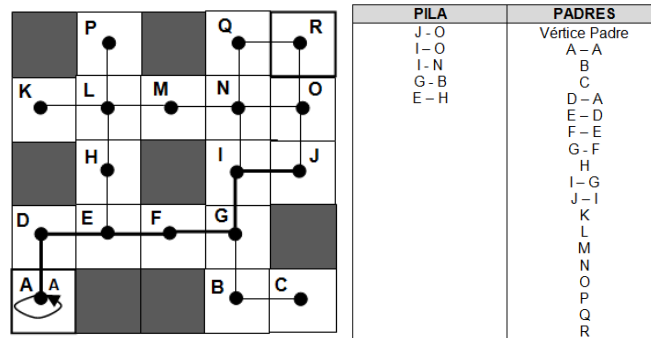


Figura 16. El robot se posiciona en el nodo J. Se registra en la tabla a su nodo padre que es I

Conforme se ha actualizado la pila, el robot se dirige hasta el vértice O, siendo J su nodo padre. Observe la Figura 17.

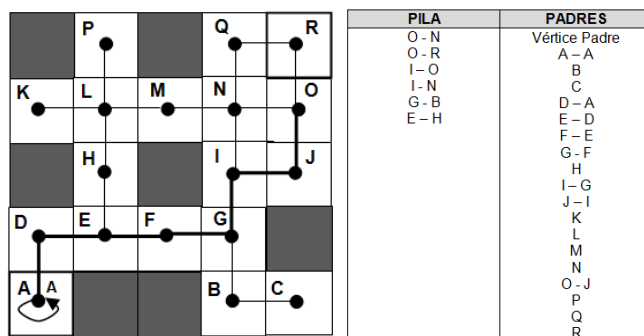


Figura 17. El robot se posiciona en el nodo O. Se registra en la tabla a su nodo padre que es J

Una vez actualizada la pila, el robot se dirige hasta el vértice N, siendo O su nodo padre, como muestra la Figura 18.

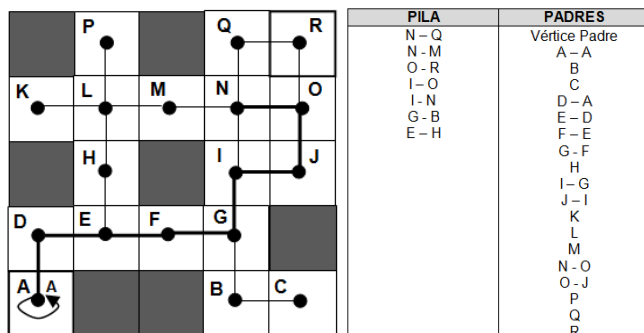


Figura 18. El robot se posiciona en el nodo N. Se registra en la tabla a su nodo padre que es O

Nuevamente se actualiza la pila y el robot se dirige hasta el vértice Q, siendo N su nodo padre (Figura 19).

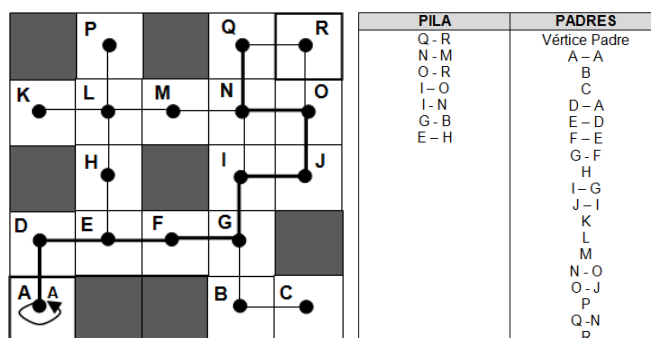


Figura 19. El robot se posiciona en el nodo Q. Se registra en la tabla a su nodo padre que es N

Conforme se ha actualizado la pila, el robot se dirige hasta el vértice R, siendo Q su nodo padre. Aquí se verifica que R es el nodo destino. En este caso concluye el algoritmo pues R es el punto hasta donde el robot debía llegar. De esta manera, se ha encontrado una ruta posible: A - D - E - F - G - I - J - O - N - Q - R, tal como se muestra en la Figura 20.

Este algoritmo ha permitido encontrar una ruta, lo que no significa que sea la más corta. Esto queda representado, además, en el grafo de la Figura 21.

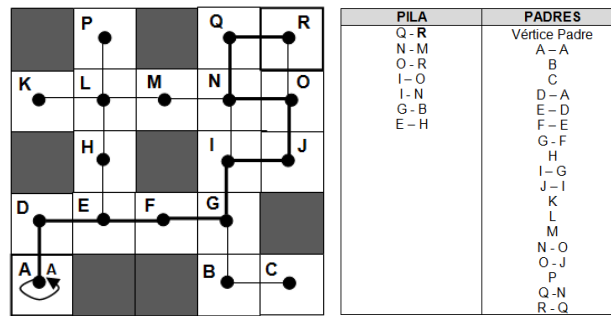


Figura 20. El robot se posiciona en el nodo destino R

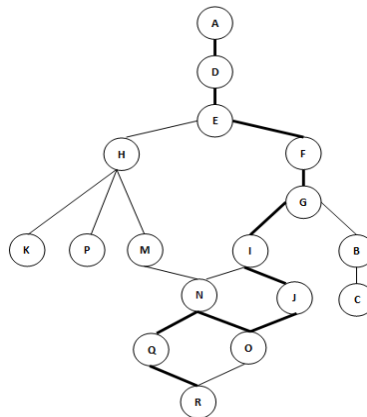


Figura 21. Diseño del grafo solución

2.2.2 Modelo de aplicación de Algoritmo de Búsqueda en Amplitud

Continuando con esta línea de investigación, se aborda el Breadth First Search o también llamado Algoritmo de Búsqueda en Amplitud. Uno de los objetivos fundamentales de este algoritmo de búsqueda consiste en la optimización de las vías que comunican los puntos de paso obligado que deben ser visitados por el vehículo robótico autónomo, redundando ello en un importante ahorro de recursos, tales como tiempo, combustible, desgaste de sus partes constitutivas, entre otros. En especial, este algoritmo recorre el grafo por niveles. Es decir, primero se visita el nodo raíz. Seguidamente se visitan todos sus hijos y para cada hijo en el paso anterior se visitan todos sus hijos y así sucesivamente. Este algoritmo verifica los nodos del siguiente nivel antes de ir a él y hasta que no finaliza un nivel de profundidad no pasa la siguiente. Esto puede observarse detenidamente en el diagrama de flujo de la Figura 22.

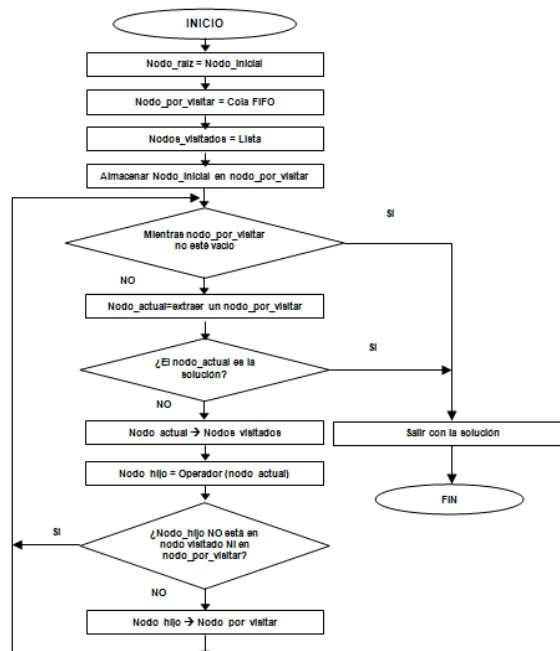


Figura 22. Diagrama de flujos

El pseudocódigo descrito en la Figura 23, permite encontrar la ruta más corta entre el nodo raíz y el objetivo, siempre y cuando el nodo objetivo exista y esté conectado al grafo.

```

INICIO
Inicializar Nodo_raíz=estado_inicial
Inicializar Nodo_por_visitar=cola FIFO
Inicializar Nodos_visitados=Lista
Almacenar el nodo_raíz en nodo_por_visitar
Mientras que nodo_por_visitar no está vacío
    Hacer Nodo_actual=extraer nodo_por_visitar
    Si el nodo_actual== solución
        Salir con solución
        Terminar
    Caso contrario
        Introducir el nodo_actual en nodos_visitados

        Hacer Nodo_hijo = operador(nodo_actual)
        Si el nodo_hijo no está en nodos_visitados ni nodo_por_visitar entonces
            Introducir un nodo_hijo en nodo_por_visitar
            Volver a Mientras...
FIN
    
```

Figura 23. Pseudocódigo del Algoritmo de Búsqueda en Amplitud

Este recorrido se implementa en la práctica usando una cola FIFO (First In First Out) para la lista de nodos adyacentes. Una cola FIFO es una estructura de datos en la que podemos hacer dos operaciones principales: almacenar un dato y sacar un dato. La particularidad de las colas FIFO es que cuando sacamos un dato, este se extrae en el mismo orden en el que se almacenó. La aplicación de este algoritmo garantiza la existencia de una ruta óptima, es decir, la ruta más corta en términos de aristas y vértices recorridos. Si hubiera más de una ruta con la misma cantidad de nodos y aristas recorridos, la solución sería la primera de ellas que se encuentre. Tal como se desarrolló el algoritmo de búsqueda en profundidad y considerando los elementos definidos en la sección precedentemente, se proponemos la aplicación de este algoritmo tal como se ilustra en la Figura 24. Allí se muestran las condiciones de inicio. Se crea un autolazo en el nodo A para dar comienzo al algoritmo y se registra el nodo A como visitado. Se recuerda que el objetivo es llegar al nodo R transitando la ruta más corta.

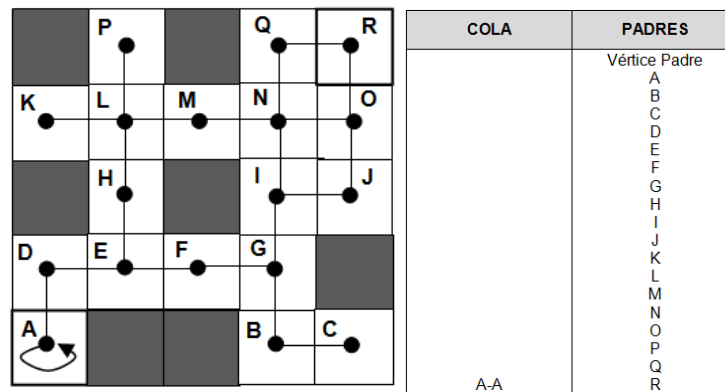


Figura 24. Condiciones iniciales. Registro de los nodos padres

Se toma de la cola la arista, se coloca a A como padre del nodo A, se adiciona la arista que sale del nodo A y se marca el nodo que recibe a la arista como conocida. De esta manera, se verifica que el nuevo nodo no es el objetivo. Observe la Figura 25.

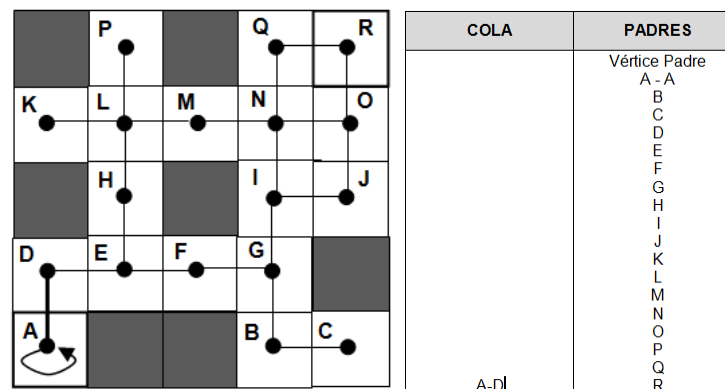


Figura 25. El robot llega al nodo D. Se registran los datos en la cola

Se toma la siguiente arista, A-D, se coloca a A como padre de D y se registran las aristas que salen de D, como se muestra en la Figura 26.

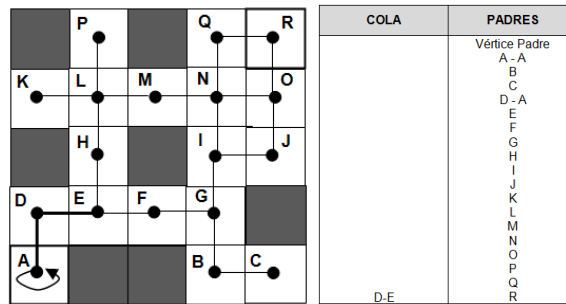


Figura 26. El robot llega al nodo E. Se registran los nodos padres

Luego, se toma la siguiente arista, D - E, se coloca a D como padre de E y se registran las aristas que salen de E, E - H y E - F, como se muestra en la Figura 27. En este momento se marcan los nodos H y F como conocidos.

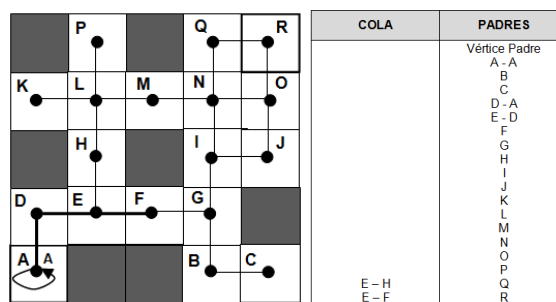


Figura 27. El robot llega al nodo F. Se registran los nodos padres

Mientras no se encuentre el nodo objetivo se continúa con la aplicación del algoritmo tal como se demostró para el caso del algoritmo de búsqueda en profundidad. A modo de ilustración, en las Figuras 28 y 29, se observa la ruta más corta encontrada tras la conclusión del algoritmo, como así también el grafo resultante. La ruta más corta para este caso está dada por el recorrido de los nodos: A-D-E-F-G-I-J-O-R.

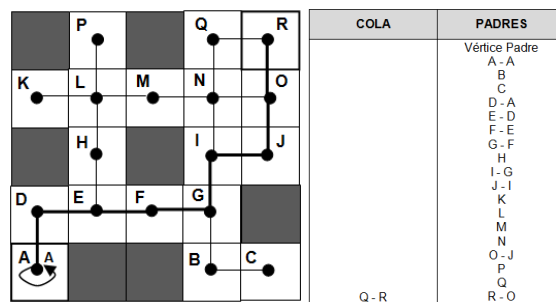


Figura 28. El robot llega al nodo destino R

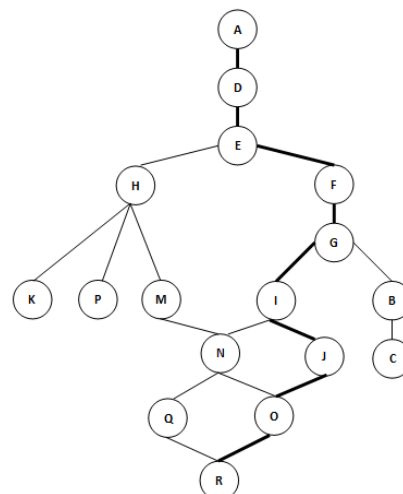


Figura 29. Diagrama del grafo resultante

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la sección 3.1 se presentan los resultados que oportunamente se obtuvieron mediante la aplicación del Modelo de Red de tipo Backpropagation; y en la sección 3.2, los obtenidos en base a la implementación de los Algoritmos de búsqueda en profundidad y en amplitud respectivamente.

3.1 Resultados obtenidos de la aplicación de la Red de tipo Backpropagation

Considerando que el paradigma es netamente reactivo, basado en la filosofía de estímulo-reacción, los resultados obtenidos por la aplicación de la tecnología de las RNA de tipo Backpropagation en función del entorno, del tipo de robot y su interacción, ha evidenciado las diferentes conductas del robot. Las observaciones realizadas para distintas orientaciones, distintos puntos de partidas, entre otras, deja en evidencia que el modelo resulta suficiente para algunos casos y limitada para otros. Asimismo, cuando el mundo adquiere mayor complejidad, o bien, cuando se hace partir al robot desde otro origen muy diferente al punto de origen con el cual se ha entrenado, éste adquiere conductas que le permiten resolver el problema a veces acertadamente y otras terminan en una colisión o en el ingreso a un bucle del que no logra salir. Si bien el tiempo de ejecución es más rápido, puesto que actúa en función de la información que le proveen los sensores, no siempre resulta esto eficiente, puesto que se ha observado que eventualmente no logra el objetivo, aunque actúe con mayor velocidad.

3.2 Resultados obtenidos de la aplicación de Algoritmos de Búsqueda

Los experimentos realizados con algoritmos de búsqueda garantizan la existencia de una ruta siempre y cuando el nodo objetivo exista y esté conectado al grafo. El algoritmo de búsqueda en profundidad ha permitido encontrar una ruta que puede o no ser la más corta mientras que el algoritmo de búsqueda en amplitud ha permitido encontrar una ruta de navegación más corta en términos de nodos visitados. La optimalidad de este algoritmo se basa en función del objetivo que se ha definido para el problema en cuestión; es decir que el robot parta de un nodo raíz y llegue a un nodo destino [10]. Desde el punto de vista computacional, el algoritmo de búsqueda en profundidad requiere mucho menos memoria pues sólo debe guardar el camino actual. El algoritmo de búsqueda en amplitud no se “pierde” explorando caminos infructuosos que consumen mucho tiempo sin llegar a una solución o de los que no se vuelve nunca; pero computacionalmente, el requerimiento de memoria es mayor, y en consecuencia si aumentara la complejidad del entorno en términos de cantidad de nodos, la situación sería comprometida.

4. TRABAJO FUTURO

Por todo lo expuesto precedentemente cabe considerar la consiguiente investigación sobre el objetivo de mejorar el desempeño del robot en lo que se refiere a sus conductas de navegación. Complementando el concepto expresado en el punto anterior, considerar la aplicación de técnicas de razonamiento de alto nivel de tipo deliberativas (aprendizaje automático y planificación autónoma de tareas entre otras) como complemento de las técnicas reactivas; las cuales, si bien son de menor velocidad de reacción que estas, también le permiten al robot afrontar requerimientos de desempeño más complejos.

En este sentido, se propone como futura línea de investigación el análisis de la performance del robot en ambientes estructurados de mayor complejidad como así también su desempeño en ambientes de operación de carácter dinámico, en los cuales los obstáculos pueden cambiar de posición mientras el robot realiza su tarea. Asimismo, y dado el objetivo planteado por los autores, se considera la aplicación de algoritmos de búsqueda más eficientes como nuevas técnicas para la resolución de este caso de estudio. Esto es posible, pues el robot se desempeña en un ambiente estructurado, es decir invariante en el tiempo. Con lo cual, y bajo estas circunstancias se plantean alternativas como algoritmos de búsqueda con costos, como posibles tópicos de análisis, como así también el abordaje de algoritmos de búsqueda informada, tales como el Algoritmo de Dijkstra y el Algoritmo A*.

5. CONCLUSIONES

5.1 Sobre la aplicación de la Red Backpropagation

De acuerdo a las investigaciones y experimentos realizados se puede concluir que el robot se desempeña bien dependiendo del lugar de salida e intentando siempre hallar la trayectoria de entrenamiento. Cabe señalar que el patrón de entrenamiento ha sido suficiente para algunas trayectorias, aunque en ciertos casos dicho patrón no resulta ser representativo del entorno en el cual opera el robot, ya que la mayoría de las salidas de la red correspondientes al movimiento de los motores del robot, es avanzar y por ese motivo es que choca partiendo desde otras posiciones. O bien, ingresa en un bucle sin poder resolver esa situación, quedando inmóvil. A efectos de disminuir este problema, se aumenta el número de patrones de entrenamiento utilizando varias trayectorias o más largas, vigilando siempre la convergencia de la red para obtener mayor convergencia para los patrones de entrenamiento y máxima generalización, para las nuevas posibles situaciones.

En síntesis, se asume que el uso de las RNA como técnica de navegación de características reactivas proporciona resultados satisfactorios para ciertas trayectorias en la fase de operación, tanto más en la medida que estas trayectorias presenten mayor similitud con las que desarrolló en la fase de entrenamiento; así es que se tendrá por caso, que el robot buscará girar más para el lado que lo hace en la trayectoria de entrenamiento que para el otro. A medida que las trayectorias que se le proponen al robot son tanto más complejas que la que este entrenó, este paradigma exhibe sus limitaciones haciendo que la red no converja y se produzcan situaciones de colisión o bucles en el ambiente de navegación. En otros términos, se produce una incorrecta generalización de la red neuronal para las nuevas situaciones que debe afrontar el robot, las cuales no se encontraban presentes en las trayectorias de entrenamiento. La idea que subyace detrás de este objetivo central, es que dichas mejoras puedan verse reflejadas en términos de evitación de obstáculos, velocidad de respuesta, optimización de las trayectorias y logro de los objetivos [4].

5.2 Sobre la aplicación de Algoritmo de Búsqueda

La experimentación realizada con el algoritmo en profundidad encontró un camino entre el nodo A y el nodo R cumpliendo con el objetivo propuesto, no asegurando que ésta sea la ruta con el cual el robot visita menos puntos de paso. El experimento realizado con el algoritmo en amplitud encontró un camino entre el nodo A y R cumpliendo no sólo con el objetivo de llegar a destino, sino que además ha visita menos nodos a su paso. Por esa razón, ambos algoritmos se consideran completos, dado que aseguran que aseguran la existencia de una ruta entre el nodo raíz y el nodo destino. La medida de la performance de ambos algoritmos, en términos de los puntos de paso visitados por el robot en su recorrido para desarrollar su trayectoria, deja ver que la búsqueda en profundidad puede considerarse menos eficiente (subóptima) que la búsqueda en amplitud (óptima). Dado que para cubrir la misma trayectoria entre el mismo origen y el mismo destino y la misma complejidad de mundo, la búsqueda en amplitud necesitó visitar menos puntos en la trayectoria realizada.

El algoritmo de búsqueda en profundidad ha permitido recorrer todos los nodos del grafo de manera ordenada, pero no uniforme mientras que el algoritmo de búsqueda en amplitud recorre todos los nodos de un árbol de manera uniforme y expande cada uno de los nodos de un nivel antes de continuar con el siguiente por esta razón sólo asegura la existencia de una ruta. El algoritmo de búsqueda en profundidad es muy similar al de búsqueda en amplitud, aunque poseen una diferencia fundamental en cuanto a la estructura de datos usada en cada caso para guardar el registro de las aristas. A diferencia de las RNA, los algoritmos de búsqueda conocen cuál es el nodo objetivo al que se desea llegar y pueden guardar información sobre cuáles nodos y aristas se han visitado previamente; mientras que las RNA actúan en función de los estímulos que recibe y de los ejemplos con los cuales ha sido entrenada, es decir que si es mayor el número de ejemplos con el cual se entrena puede inferirse que aprenderá mejor. En ambos casos deben tener un conocimiento previo del entorno con el cual interactúan.

En este sentido, las redes neuronales no siempre encuentran una ruta acertada de acuerdo a los requerimientos, y los algoritmos de búsqueda, de acuerdo al tipo que se utilice, no sólo entrega una ruta, sino que puede incluso entregar la ruta más corta en términos de puntos de paso visitados, los que pueden traducirse en espacios de trabajo que el robot deba visitar previamente antes de llegar a destino. Por otro lado, dado que la arquitectura de la red Backpropagation actúa en base a un sistema sensor-actuar de características reactivas, esto le proporciona mayor velocidad al vehículo robótico; como contrapartida, la implementación de los algoritmos de búsqueda, de carácter deliberativo y secuencial (desde el punto de vista de la programación), por lo tanto es más lento, lo cual puede traducirse, en un mundo complejo, en una desventaja en términos de tiempo, dinero, consumo energético, entre otros.

REFERENCIAS

- [1] R. García, M. Servente, D. Pasquín. "Sistemas Inteligentes", Ed. Nueva Librería, Buenos Aires, Argentina, 2003.
- [2] J. Santos, R. Duro, "Evolución Artificial y Robótica Autónoma", Ed. Alfaomega – Ra-Ma, México 2005.
- [3] I. Harvey, "Artificial Evolution and Real Robots, Proceedings of Internacional Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB)", Masanori Sugisaka (Ed), Beppu, Japan, pp. 138-141, 1996.
- [4] A. Ollero, "Robótica Manipuladores y robots móviles". Ed. Alfaomega – Marcombo, Barcelona España, 2007.
- [5] J. R. Hiler, V. J. Martínez, "Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones", Ed. Alfaomega Ra-Ma. Madrid, España, 2000.
- [6] A. A. Hossian, L. A. Cejas, L. V. Olivera, "Estudio del comportamiento de vehículos robóticos en ambientes computarizados. Hacia un enfoque basado en conductas del tipo estímulo-respuesta", IV^º Jornadas de Enseñanza de la Ingeniería JEIN - UTN - FRA, Buenos Aires, Argentina 2014.
- [7] A. Scillato, D. Colón, J. Balbuena, "Técnicas de Navegación Híbrida para Navegación de Robots Móviles", Ed. Rama de Estudiantes del IEEE. Trabajo de grado. Universidad Nacional del Comahue 2005.
- [8] A. A. Hossian, R. García, L. V. Olivera, "Robótica de Navegadores. Un enfoque desde las Tecnologías Inteligentes", Ed. Nueva Librería, Buenos Aires 2014.
- [9] N. Arrijoa, "Inteligencia Artificial", Gradi, Buenos Aires 2007.
- [10] A. García, "Inteligencia Artificial. Fundamentos, práctica y aplicaciones", Alfaomega, México 2012.

Modelos de madurez de la gestión de la seguridad y salud en el trabajo

Yuber L. Rodríguez R.¹

Harold Hernández C.²

Magda V. Monroy S.³

Universidad Santo Tomás – Colombia

Este capítulo tiene como objetivo analizar los modelos de madurez de la gestión de la seguridad y salud en el trabajo descritos en la literatura científica. Para ello, se realizó una revisión sistemática de artículos publicados entre el 2000-2017 en Science Direct, Scopus y Redalyc y literatura gris para identificar los modelos de madurez de gestión de la seguridad y salud en el trabajo existentes, su propósito y estructura. Se identificaron 10 modelos de madurez, 8 enfocados a la cultura de seguridad, a los procesos de la gestión de la seguridad y salud en el trabajo, a la madurez de la gestión organizativa de la SST, al proceso de aprendizaje en SST, a la integración de los estándares del sistema de gestión de seguridad en la industria minera y la implementación de programas ergonómicos, y 2 dirigidos a la gestión del riesgo y la complejidad. Se concluye que son pocos los modelos desarrollados, ninguno de ellos se ha desarrollado para el sector servicios entre ellos, el sector salud y el sector educativo.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad y salud en el trabajo (SST) es una problemática global de las organizaciones. Es por ello, que los Estados en las últimas décadas han asumido con mayor rigor las recomendaciones de la Organización Internacional del Trabajo (OIT). Este organismo tripartito publicó en el 2001 las Directrices relativas a los sistemas de gestión en seguridad y salud en trabajo, las cuales son orientaciones para todos los Estados dirigidas a la creación de política pública y reglamentación asociada a los Sistemas de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST).

Atendiendo a la exigencia de los Estados a las empresas de diseñar, implementar, mantener y mejorar los SG-SST, las organizaciones y organismos asesores o administradores de los riesgos laborales [como las Administradoras de Riesgos Laborales (ARL) para el caso de Colombia] han desarrollado modelos para medir el desempeño de estos sistemas de gestión. Es por ello, que han surgido otros métodos de evaluación como los modelos de madurez de la gestión de la SST [1]. El concepto “modelo de madurez” fue desarrollado por primera vez por el Instituto de Ingeniería de Software en 1993 como un mecanismo para mejorar el desarrollo y el mantenimiento de software [2]. Así mismo la conceptualización de los modelos de madurez en SST surgió a partir de investigaciones de la gestión de la seguridad principalmente, cuyos resultados han sido aplicados al desarrollo de la cultura de seguridad en ambientes de alto riesgo, como son las industrias petroquímicas, marítimas, ferroviarias y aéreas [1].

Lo anterior evidencia que los avances en los modelos de madurez de la gestión de la SST han partido de escenarios ajenos como la industria de software, la ingeniería y las ciencias de la gestión y no propiamente de la SST. Esto muestra la interdisciplinariedad requerida para la gestión de la SST. En este sentido, en este capítulo de libro se identifican los modelos de madurez de gestión de la SST existentes, su propósito y estructura, y se conceptualizan como un mecanismo para medir los niveles de desempeño de los SG-SST en las organizaciones.

2. MÉTODO

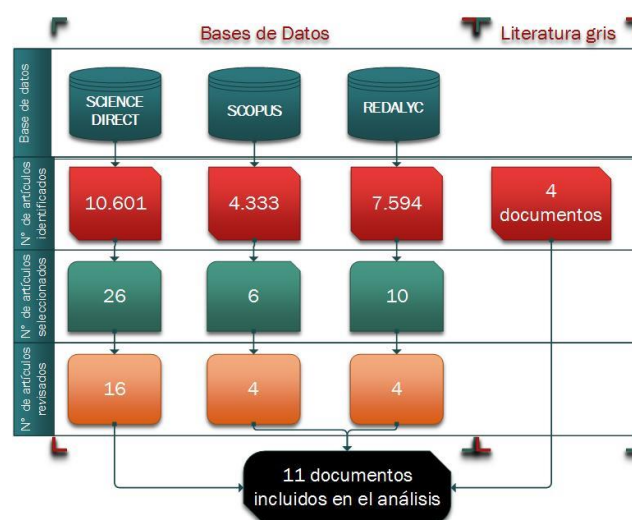


Figura 1. Depuración de artículos en las bases de datos

¹ yuberrodriguez@usantotomas.edu.co

² harold.hernandez@usantotomas.edu.co

³ magdamonroy@usantotomas.edu.co

Se realizó una revisión sistemática de artículos publicados entre el 2000-2017 en *Science Direct*, *Scopus* y *Redalyc* y literatura gris para identificar los modelos de madurez de gestión de la seguridad y salud en el trabajo existentes y su aplicabilidad en las organizaciones. La revisión consideró los términos clave *maturity model*, *safety and health*, *occupational health and safety management*. La búsqueda inicialmente se efectuó sin límite de año de publicación, posteriormente se identificó que los artículos se concentraban entre el 2000 y el 2017. Los criterios de inclusión considerados fueron: artículos de resultado de investigación o de revisión sistemática que en su título mencionaran las de los términos clave mencionados, que hayan sido publicados en revistas especializadas indexadas en las bases de datos referidas. El proceso de depuración de los artículos se presenta en la Figura 1.

La información fue recopilada, organizada por autor y fecha de publicación y posteriormente se usó el análisis de contenido siguiendo el método de análisis de contenido propuesto por [3], quien plantea tres niveles: superficie, analítico e interpretativo. En el primero se describe la información, en el segundo se clasifica y se ordena y en el tercer se comprende y se le da sentido al texto.

3. RESULTADOS

3.1 Conceptualización de madurez de la gestión de la seguridad y salud en el trabajo

Un modelo de madurez se puede concebir como una estructura conceptual, con partes constituyentes, que define la madurez del área de interés; sumado a ello, puede proveer información para identificar los procesos que va a necesitar la organización para alcanzar un futuro deseado. En este sentido, señalan que el desarrollo de la madurez es un proceso continuo dentro de las organizaciones [4]. Los modelos de madurez son herramientas basadas en una metodología no determinista, que permiten la evaluación a través de la identificación de las variables más relevantes que influyen en sus salidas. Lo ideal sería que, además de esta identificación, un modelo de madurez proporcione la información relativa a las relaciones cualitativas y cuantitativas entre variables y que permita explicar cómo éstas afectan a la variable latente, es decir, el nivel de madurez del objeto maduración. En cuanto a la evaluación del SG-SST (objeto de maduración), generalmente su evaluación se basa únicamente en indicadores del SG-SST; sin embargo, otras evaluaciones se basan en las acciones de mejora y en los aportes de otros subsistemas de gestión implementados, lo que refleja un contexto integrado. Este hecho reformula el propósito del SG-SST dentro de una empresa y exige una visión sistémica del responsable del SG-SST [5].

Los modelos de madurez son guías para ayudar a las organizaciones a mejorar sus formas de operar y corresponden a una evaluación de las metodologías para la gestión en las organizaciones en aspectos como la calidad [6]. Los autores mencionados en su investigación al reconocer los beneficios de los modelos de madurez se preocuparon por indagar sobre el comportamiento de estos en pequeñas y medianas empresas (PYMES) y encontraron que, dada la poca estructura y la escasez de recurso humano calificado en las organizaciones, su aplicación es difícil. No obstante, sugieren tomar modelos orientados a los procesos y su organización que sea simple y de fácil aplicación; además, se pueden apoyar en los requisitos de normas de la ISO relacionadas con sistemas de gestión como la 9001.

Además, los modelos de madurez permiten evaluar un conjunto de prácticas en SST adoptadas por las organizaciones; estos son útiles tanto para evaluar el desempeño de los SG-SST como para proponer acciones acordes con las necesidades de la organización [7]. Por otra parte, Portella y otros [8] indagan por el comportamiento de los modelos de madurez para la gestión de las organizaciones del tercer sector, las cuales básicamente comprende las entidades sin ánimo de lucro o de economía social. De acuerdo con los autores existen una tendencia creciente de estas organizaciones y una presión por sus partes interesadas y por las exigencias legales para demostrar el manejo de las donaciones; por lo tanto, se requieren herramientas e instrumentos que permitan evaluar el desempeño de su gestión organizacional, y de esta manera contribuir al logro de una gestión sostenible.

Los modelos de madurez ayudan en la identificación de fortalezas y debilidades de las organizaciones por ende facilitan el tener foco en las oportunidades de mejora [8]. A su vez, aplicar modelos de madurez de la gestión en las organizaciones brinda estatus, posicionamiento de marcar puesto que las organizaciones pueden demostrar su progresión en la gestión, lo cual les dará una ventaja competitiva en el mercado puesto que evidencia sus capacidades, su desarrollo y perfeccionamiento en los procesos. Particularmente, sobre las organizaciones del tercer sector existe mayor foco sobre las evaluaciones e indicadores de resultado, precisamente porque los inversores desean saber cuál fue el destino y el impacto social de los recursos suministrados; siendo este un campo de interés investigativo en la gestión organizacional dado sus pocos desarrollos a la fecha. Es por ello que se desarrolló un modelo con 5 dimensiones (comunicación, beneficiarios, estrategia y planes, sociedad y redes colaborativas, liderazgo) y 16 variables para medir la madurez de la gestión organizacional en estas organizaciones [8]; sin embargo, este modelo tiene una orientación hacia los beneficiarios y la gestión de proyectos sociales y solo contempla uno de los aspectos de la GSST que es el liderazgo.

En otras palabras, los modelos de madurez son una secuencia de niveles que reúnen un conjunto de características de la gestión. Estos niveles constituyen y anticipan caminos lógicos que llevan a la organización de un estado inicial a un

nivel de madurez en la organización, por cuanto la GSST debe integrarse en la gestión global de la organización. En este sentido, el modelo que evidencia la madurez de los sistemas integrados de gestión contempla tres variables: visión amplia de la alta dirección, la clasificación de los niveles de integración, y los tipos de auditoría [9], [10]. Otros autores señalan que la madurez incluye los niveles de habilidad de la organización, por cuanto proporciona elementos y medidas definidas. La madurez implica un progreso evolutivo en la demostración de habilidades específicas para lograr objetivos, desde un estado inicial en el que se consideran unos conocimientos relacionados con la complejidad de la gestión hasta un estado final, que completa la optimización de los recursos de empresa para alcanzar los objetivos de armonización de la complejidad interna y externa de la organización [2].

En términos generales, los modelos de madurez permiten la búsqueda de vulnerabilidades y la identificación de medidas de mejora, un mejor control de los costos y el tiempo o en una versión anterior y más predecible y precisa introducción de actividades de gestión de la complejidad. Considerando lo anterior, los modelos pueden tener tres aplicaciones: 1) en la gestión de calidad y herramientas del campo del desarrollo de la SST, 2) en los campos de la gestión en proyectos y procesos y 3) comprobar el estado de los procesos de negocio [2]. La madurez de la gestión SST es una secuencia de niveles que reúnen un conjunto de características de la gestión. Estos niveles constituyen y anticipan caminos lógicos que llevan a la organización de un estado inicial a un nivel de madurez en la organización, por cuanto la GSST debe integrarse en la gestión global de la organización.

3.2 Modelos de madurez de la gestión de la seguridad y salud en el trabajo

Los modelos de madurez de la gestión de la SST han mostrado desarrollos en las tres últimas décadas como se puede apreciar en la Tabla 1. Uno de los primeros modelos publicados para la evaluación de la madurez de la cultura de seguridad [11] se planteó para la industria de petróleo y gas; sin embargo, esta propuesta no fue validada de acuerdo con lo reportado por el autor. Se estructuró en cinco niveles de madurez:

1. *Emergencia*. En este nivel la seguridad se define en términos de soluciones técnicas a través de procedimientos y del cumplimiento de la normativa. La seguridad no se ve como un riesgo clave del negocio y el departamento de seguridad se percibe como el responsable principal de la seguridad. Muchos de los accidentes se ven como inevitables y como parte del trabajo. La mayoría del personal del staff no está interesado en la seguridad y la salud, sólo puede utilizar como base para otros argumentos, como por ejemplo los cambios en los sistemas de turnos.
2. *Administración*. En este nivel la tasa de accidentes de la organización está por arriba de la media de accidentes del sector al que pertenece la organización. La seguridad es vista como un riesgo del negocio y la gestión y el esfuerzo de la organización se orientan a la prevención de accidentes. La seguridad se define únicamente en términos de adherencia a las reglas y procedimientos y controles de ingeniería con los que cuenta la organización. Los accidentes son vistos como evitables. Los gerentes perciben que la mayoría de los accidentes son causados únicamente por el comportamiento inseguro del personal. El desempeño de seguridad se mide en términos de indicadores rezagados como tiempo perdido a causa de las lesiones derivadas de los accidentes (LTI – siglas en inglés) e incentivos de seguridad se basan en la reducción de las tasas de LTI. Los altos directivos son reactivos en su participación en las actividades de seguridad y salud adelantadas.
3. *Participación*. En este nivel las tasas de accidentes son relativamente bajas, pero se mantienen en una meseta. La organización está convencida de que la participación de los empleados en la SST es crítica para la mejora futura. Los gerentes reconocen que una amplia gama de factores genera los accidentes y las causas fundamentales se originan en las decisiones de gestión. Una proporción significativa de los empleados están dispuestos a trabajar con la administración para mejorar la seguridad y la salud. La mayoría del personal acepta la responsabilidad individual de su seguridad y de su salud. El desempeño de seguridad se controla de forma activa y los datos se utilizan con eficacia.
4. *Cooperación*. En este nivel la mayor parte del personal de la organización considera que la SST es importante, tanto desde el punto de vista moral como económico. Los administradores y el personal reconocen que una amplia gama de factores causa los accidentes y estos factores son importantes en la toma de decisiones. El personal acepta la responsabilidad de su propia SST. Los empleados se sienten valorados y reconocen un trato justo. La organización muestra un esfuerzo significativo en medidas proactivas para prevenir accidentes. El desempeño de la seguridad se controla de forma activa utilizando todos los datos disponibles. Los accidentes no laborales también son monitoreados y se promueve un estilo de vida saludable.
5. *Mejora continua*. En este nivel la prevención de todas las lesiones o daños a los empleados (tanto en el trabajo como en el hogar) es un valor principal de la empresa. La organización ha tenido un período prolongado (años) sin accidentes registrables o de alto potencial incidente; sin embargo, se percibe la preocupación por la generación de nuevos accidentes. La organización utiliza una serie de indicadores para monitorear el desempeño, pero no está basada en el rendimiento, ya que tiene confianza en sus procesos de seguridad. La organización se esfuerza constantemente por mejorar y encontrar buenas prácticas para la generación de mecanismos de control de riesgos. Todos los empleados comparten la creencia de que la SST es un aspecto crítico de su trabajo y aceptan que la prevención de las lesiones que no son derivadas del trabajo también es importante. La empresa invierte un esfuerzo considerable en la promoción de la seguridad y de la salud en el hogar.

Tabla 1. Modelos de madurez asociados a la gestión de la seguridad y salud en el trabajo

Autor	Denominación	Objetivo	Niveles/ etapas	Descripción
Fleming [11]	Modelo de madurez de la cultura de seguridad	Ayudar las organizaciones a: Establecer su nivel actual de madurez de la cultura de seguridad Identificar las acciones requeridas para mejorar su cultura.	5 niveles	Nivel Uno: Emergencia. Nivel Dos: Administración. Nivel Tres: Participación. Nivel Cuatro: Cooperación. Nivel Cinco: Mejora continua.
Cliff [12]	Modelo de madurez de la cultura de seguridad (5 pasos en seguridad)	Evaluar y caracterizar la mejora de la cultura de seguridad y salud en el trabajo en las organizaciones.	5 niveles	Nivel 1: Emergente Nivel 2: Gestionado Nivel 3: Involucrado Nivel 4: Cooperación Nivel 5: Mejoramiento continuo Contempla tres niveles de los principales indicadores de desempeño: Nivel 1: cumplimiento, Nivel 2: mejora, Nivel 3: aprendizaje
Favaro y Drais [13]	Tipología de los procesos de SGSST	Detectar las modalidades de implementación de los sistemas de gestión de seguridad y salud	4 tipologías que cruzan dos ejes: dirección funcional (central y local) y la lógica de prevención (centrada en las prácticas y en los procedimientos)	Tipo I "ideológico" Tipo II "innovador" Tipo III "cascada" Tipo IV "aplicado"
Agencia Europea Seguridad y Salud en el Trabajo [14]	Etapas de madurez en la gestión organizativa de la seguridad y salud en el trabajo propuestas por Zwetsloot (2000).	Distinguir las etapas de madurez en la gestión organizativa de la seguridad y salud en el trabajo	4 etapas	Etapas Etapa ad hoc (etapa reactiva) Etapa sistemática Etapa sistema Etapa proactiva
Agencia Europea Seguridad y Salud en el Trabajo [14]	<i>ASET model (Atmosphere-Systems-Exposure-Targets)</i>	Evaluar el grado en que el proceso de aprendizaje de la seguridad y salud en el trabajo se establece en una organización.	5 niveles	Niveles: 1. Supuestos básicos: aprendizaje cultural 2. Valores, creencias, normas (Atmósfera): Triple lazo 3. Reglas, procedimientos (Sistemas): doble lazo 4. Comportamiento, entorno, etc. (Exposición): individual lazo Accidentes, incidentes, etc. (Tarjet)
Filho, Andrade y Marinho. [15]	Modelo de madurez de la cultura de seguridad para la industria petroquímica	Identificar las dimensiones y el nivel de madurez de la cultura de seguridad para organizaciones de petróleo y gas.	5 dimensiones 5 niveles	5 dimensiones: Información, Aprendizaje organizacional, Participación, Comunicación, Compromiso 5 niveles: Patológico, Reactivo, Calculador, Proactivo, Generativo
Foster y Hault, [16]	Minerals Industry Risk Management (MIRM) Maturity Chart	Medir el progreso en la integración de los estándares del sistema de gestión de seguridad.	5 peldaños de la gestión del riesgo de la industria minera	Peldaño 1. Gestión "vulnerable". Aceptar que los accidentes ocurren. Peldaño 2. Gestión "reactiva". Evitar un incidente similar. Peldaño 3. Gestión de "cumplimiento". Prevenir incidentes antes de que ocurran. Peldaño 4. Gestión "proactiva". Mejora de los sistemas. Peldaño 5. Gestión "resiliente". Camino para hacer negocios. Sitio que ha integrado con éxito la seguridad y la gestión de riesgos en sus operaciones.
Rodríguez, Pérez y Montero [17]	El Modelo de Madurez de Ergonomía para Empresas (MMEE)	Evaluar la capacidad de las empresas para implementar programas ergonómicos	5 niveles. Está dirigido al diagnóstico macroergonómico de las organizaciones.	Nivel 1: Desconocimiento Reconocimiento de la ergonomía Nivel 2: Entendimiento Intervenciones ergonómicas Nivel 3: Experimentación Programas ergonómicos Nivel 4: Uso regular Cultura ergonómica Nivel 5: Innovador
Rodríguez y Pérez [18]				

Por su parte la Agencia Europea de Seguridad y Salud en el Trabajo [14] refiere que para aplicar un sistema de GSST efectivo, hay que prestar especial atención a la consecución de las etapas apropiadas de madurez de la GSST en la organización, antes de integrarlo en el sistema general de negocios. En este sentido, la formación de las actitudes y comportamientos de los trabajadores hacia la SST tienen un papel importante. Esto incluye el compromiso en la

gestión, el establecimiento de objetivos de la SST, la definición de las responsabilidades y la formación, la motivación, la comunicación y la supervisión. Además, el liderazgo de la alta dirección debe ser explícito y ser demostrado. Los seminarios adecuadamente organizados, el flujo adecuado de la información y la confianza mutua entre los empleados y la alta dirección, así como un amplio compromiso de los empleados con las medidas planteadas por el control del ambiente de trabajo, son propicios para una buena cultura de SST, la cual tiene un impacto mucho mayor en la efectividad del sistema de GSST. En este sentido, es indispensable precisar el nivel de madurez de los sistemas de GSST, para lo que reconocen cuatro etapas de madurez de esta gestión en la organización:

1. *Ad hoc* (etapa reactiva): las organizaciones tienen poca experiencia en la gestión de la SST y reaccionan a los problemas (por ejemplo, accidentes, ausentismo) a medida que surgen.
2. *Sistemática*: las organizaciones llevan a cabo la evaluación de riesgos periódica, efectúan una planificación de acciones, realizan la priorización de problemas y aplican las medidas de control previstas. En esta etapa se solicita experiencia externa, dado que la organización se encuentra fortaleciendo competencias internas en SST.
3. *Sistema*: Es el escenario en el que las organizaciones implementan y mantienen un sistema de GSST por la atención estructural continua con la SST que se organiza antes del inicio de nuevas actividades.
4. *Proactiva*: las organizaciones integran la GSST en otros sistemas de gestión (calidad y medio ambiente) o en sus procesos de negocio; la atención se centra en la mejora continua. El esfuerzo se realiza en la etapa de diseño de productos, procesos, lugares de trabajo y la organización del trabajo, y se promueve el aprendizaje colectivo (La revisión de la literatura que soporta estos elementos fue realizada por expertos de cuatro instituciones reconocidas en el campo de la SST, a saber: Prevent (Institute for Occupational Safety and Health, Belgium), FIOH (Finnish Institute for Occupational Health, Finland), HSL (Health and Safety Laboratory, UK) and CIOP-PIB (Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, Poland).

Adicionalmente, la Agencia Europea de Seguridad y Salud en el Trabajo [14] describe el modelo *ASET* (*Atmosphere-Systems-Exposure-Targets*). El modelo representa el vínculo entre la cultura o la atmósfera de una organización, los sistemas que son implementados, los riesgos a los que están expuestas las personas y los objetivos de SST que se miden, es decir, los incidentes resultando en problemas de salud o lesiones. La relación causa-efecto entre cultura, sistemas, exposiciones y lesiones.

Otro de los modelos para evaluar la madurez se gestó en Francia como producto de una investigación adelantada en el sector de manufactura. En este estudio, se precisa que la madurez de la GSST debe considerar la relación entre dos ejes esenciales a saber: la dirección de la organización y la lógica de la prevención adelantada en la organización [19]. En otras palabras, la madurez de la GSST es concebida como el grado de integración en el funcionamiento de la organización y su relación con las modalidades técnicas de prevención y contempla cinco niveles como se aprecia en la Figura 2, en donde el nivel ideal de integración de la prevención en el funcionamiento de las organizaciones se reconoce como una gestión “estratégica” ([20]).

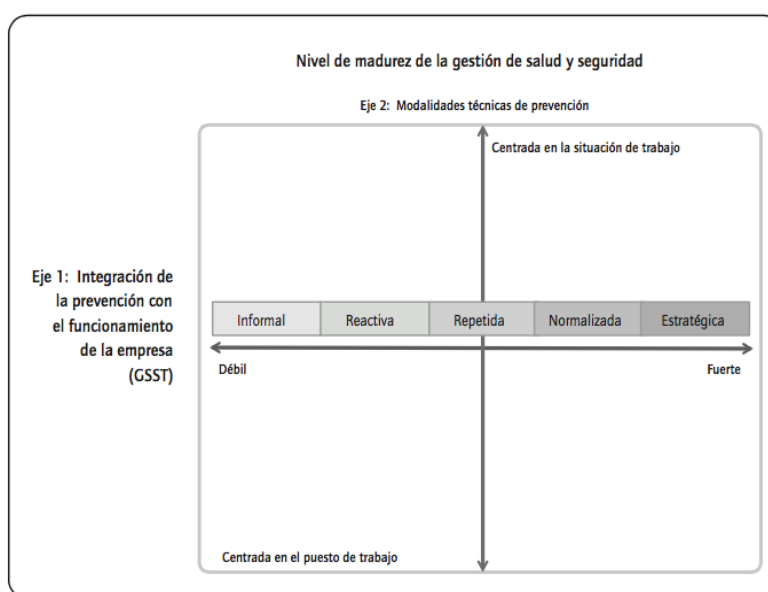


Figura 2. Nivel de madurez de la gestión de la salud y seguridad [20]

En la investigación adelantada por Draais y otros [19] se establecen cuatro tipologías de la GSST, las cuales fueron concebidas a partir de las características detectadas en la GSST de las organizaciones analizadas, como se aprecia en la Figura 3.

TIPOLOGÍA DE LOS PROCESOS DE SGSST		DIRECCIÓN FUNCIONAL	
		CENTRAL	LOCAL
Lógica de la prevención	Centrada en las prácticas	tipo I. SGSST "Ideológico"	tipo II. SGSST "Innovador"
	Centrada en los procedimientos	tipo III. SGSST "cascada"	tipo IV. SGSST "aplicado"

Figura 3. Tipología de la GSST

Las tipologías definidas fueron agrupadas en dos ejes, el primero corresponde a aquellos sistemas encaminados a la lógica de la prevención y los segundos se refieren a la dirección funcional; para ello, se identificaron quince (15) criterios para identificación de la tipología de los sistemas de GSST (Tabla 2).

Tabla 2. Criterios descriptivos para la tipología de los sistemas de gestión de la salud y seguridad en el trabajo [13]

Descriptor	Tipos de prácticas SGSST			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Origen	Direcciones de empresas	Mandos	Direcciones generales	Servicios HSEQ
Objetivo principal esperado	Integrar la SST en el comportamiento del personal	Integrar la SST en las prácticas profesionales	Integrar la SST en las políticas locales	Formalizar gestión detallada de la SST
Principales responsables y participantes	Dirección y mandos medios	Mandos medios y personal con apoyo de las funciones/ los funcionales de seguridad	Dirección nacional o regional con funciones/ funcionales de seguridad	Staff de seguridad con los mandos medios
Modalidades de difusión de los programas	RH con evaluaciones individuales	Grupos de trabajo compuestos por miembros del personal	Reuniones de información por niveles jerárquicos	Reuniones con los mandos
Estilo dominante de gestión SST	Gestión estandarizada	Gestión a la medida	Gestión estandarizada	Gestión Técnica
Necesidades en diversos recursos	Importantes	Importantes	Moderados	Importantes
Recursos acordados	Importantes	Negociados	Limitados	Limitados
Modos de información/ formación del personal	Diseminado	Sistemático	Superficial	Limitado
Participación del personal	Fuerte (en la fase operacional)	Fuerte (durante la implementación)	Débil	Débil
Rol atribuido a representantes del personal	Simple información	Solicitud de participar	Simple información	Consulta
Concepción general de los Riesgos	Individualizada	Unificada	Heterogénea (y no tomada en cuenta)	Heterogénea (y tomada en cuenta)
Perímetro de los riesgos Tratados	Dentro y fuera de la empresa	Diversificado dentro de la empresa	Limitado dentro de la empresa	Focalizado en la empresa
Tendencia en el análisis de los riesgos	Selectiva	Amplia y precisa	Global y sucinta	Exigente (con jerarquización)
Modalidades de implementación de las reglas	Rígidas	Exigentes	Formales	Progresivas
Aceptación /apropiación de las reglas	Fuerte	Fuerte	Débil	Intermedia

De esta base se derivaron las tendencias de sistemas [19]:

1. *Tipo I* "ideológico" (dirección central y centralización en las prácticas): con una clara responsabilidad de los trabajadores y el sistema concebido "...como el medio para modificar las actitudes y los comportamientos, con el fin de tener un control óptimo de las exposiciones profesionales, incluso de unificar las actitudes al interior de una cultura común de prevención" [13]. Se evidencia una integración de las acciones de SST con las actividades de la empresa y se cuenta con seguimiento por la dirección; requiere de un estilo de gestión normativo, por ende, poco flexible en la coordinación de la SST.
2. *Tipo II* "innovador" (dirección local y centralización en las prácticas): a una gestión pragmática. Generalmente la reestructuración de la organización está directamente relacionada con la mejora de la SST optimizando al máximo los recursos. Sus actividades están articuladas con los demás sistemas de gestión de las organizaciones. Una posible debilidad es su vulnerabilidad debido a la necesidad de una actitud positiva y de compromiso constante por la dirección. Se caracteriza por una fuerte participación de todos los actores involucrados, por lo tanto, su interacción conlleva la unificación de las concepciones generando mayor consistencia en las actividades

emprendidas. Lo anterior implica una gestión dinámica acorde con los proyectos desarrollados por las organizaciones.

3. *Tipo III "cascada"* (dirección central y centralización en los procedimientos): concebido por una autoridad central con el propósito de hacer una aplicación generalizada y basado en las jerarquías locales. Su estructura es rígida y puede llegar a subestimar las actividades consideradas susceptibles de intervención o puede enlentecer las acciones que requieran de control y seguimiento.
4. *Tipo IV "aplicado"* (dirección local y centralización en los procedimientos): El concebido como una iniciativa de los responsables de la SST, que pueden o no trabajar simultáneamente con los encargados de calidad y medio ambiente. Generalmente las acciones son impuestas, aunque cuentan con todo el análisis técnico desde la concepción de análisis de riesgos, brindado por dichos responsables de la SST.

Otro modelo para identificar las dimensiones y el nivel de madurez de la cultura de seguridad para organizaciones de petróleo y gas [15], está basado en la propuesta de Hudson [21], dado que fue diseñado para esta industria y contiene 5 niveles y 5 dimensiones:

Niveles:

1. *Patológico*: la seguridad es un problema causado por los trabajadores. Lo principal es el negocio y no ser atrapados por los entes reguladores.
2. *Reactivo*: las organizaciones comienzan a tomar la seguridad en serio, pero solo se dan las acciones después de incidentes.
3. *Calculador*: la seguridad es impulsada por los sistemas de gestión, con gran cantidad de datos. La seguridad sigue siendo impulsada principalmente por la administración e impuesta en lugar de ser buscada por la fuerza de trabajo.
4. *Proactivo*: con un rendimiento mejorado, lo inesperado es un desafío. La participación de la fuerza de trabajo comienza a alejar la iniciativa de un enfoque puramente descendente.
5. *Generativo*: hay participación activa en todos los niveles. La seguridad se percibe como una parte inherente del negocio. Las organizaciones se caracterizan por la incomodidad crónica como contrapeso a la autocomplacencia.

Dimensiones:

1. *Información*: describe una organización que cuenta con un sistema formal que permite a sus empleados informar sobre los casi accidentes y la confianza que tienen los empleados en la organización, sintiéndose lo suficientemente cómodo como para informarlos. Estos son aspectos esenciales de una cultura informada y una cultura justa. También describe qué indicadores tiene la organización para mejorar el desempeño de la seguridad en el lugar de trabajo.
2. *Aprendizaje organizacional*: involucra la forma en que la organización trata la información, cómo la organización analiza los accidentes e incidentes en el lugar de trabajo, y se mantiene a los empleados informados sobre estos eventos.
3. *Participación*: describe cómo la organización lleva a los empleados a una participación creciente en aspectos de seguridad, en el análisis de accidentes y en la revisión de procedimientos y reglamentos. También incluye si los empleados participan en comités de seguridad y reuniones de seguridad.
4. *Comunicación*: describe cómo, cuándo y qué comunicar con respecto a los problemas de seguridad a los empleados. Además, si hay un canal de comunicación abierto entre empleados y gerentes. También describe si la comunicación llega a los empleados y es entendida por ellos.
5. *Compromiso*: describe el apoyo brindado por la organización en lo que se refiere a Salud y Seguridad: planificación, prioridades, capacitación, auditoría, contratistas, incentivos, inversión, procedimientos y equipo. También describe que hay un SG-SST y medio ambiente. El compromiso sincero significa más que escribir declaraciones políticas para decir que la SST son importantes; esta debe tener coherencia con la realidad.

Particularmente, en Australia se creó un modelo orientado a la mejora de la cultura de seguridad para las organizaciones de la industria minera, el cual incluye cinco niveles a saber: Nivel 1: Emergente, Nivel 2: Gestionado, Nivel 3: Involucrado, Nivel 4: Cooperación, Nivel 5: Mejoramiento continuo. Además, contempla tres niveles de los principales indicadores de desempeño: Nivel 1: cumplimiento, Nivel 2: mejora, Nivel 3: aprendizaje [12]. En este mismo país, un equipo de la Universidad de Queensland desarrolló un modelo de madurez de la gestión del riesgo para la industria minera. Este modelo se describe como una escalera de mano que tiene cinco etapas o "peldaños" [16]:

1. Gestión "vulnerable". Aceptar que los accidentes ocurren
2. Gestión "reactiva". Evitar un incidente similar

3. Gestión de “cumplimiento”. Prevenir incidentes antes de que ocurran
4. Gestión “proactiva”. Mejora de los sistemas
5. Gestión “resiliente”. Camino para hacer negocios. Sitio que ha integrado con éxito la seguridad y la gestión de riesgos en sus operaciones.

Por su parte Kluth y otros [2] proponen un modelo de madurez con seis niveles. Este modelo se basa en la madurez general para la evaluación de sistemas de gestión de la complejidad (La complejidad en el estudio citado es vista como la combinación de varios elementos, heterogéneos del sistema y sus interrelaciones, las cuales cambian de forma dinámica y poco comprensible):

1. *Inicial*: No comprensión de la complejidad. La organización aún no ha reconocido que se trate o se definan estrategias para cualquier problema de complejidad.
2. *Definida*: Los campos de complejidad están definidos. La organización ha identificado los elementos de complejidad interna y externa.
3. *Cualitativa*: La complejidad se evaluó cualitativamente. La organización utiliza métodos para evaluar la complejidad existente en los diferentes campos de la complejidad de una manera cualitativa.
4. *Cuantitativa*: Los indicadores claves de rendimiento son cuantitativos. La compañía ha elaborado indicadores clave de rendimiento (KPI) específicos, con el fin de cuantificar la complejidad existente en términos de las cuatro dimensiones (variedad, heterogeneidad, dinámicas e interrelaciones) de complejidad.
5. *Analizados*: se generan patrones de complejidad. La organización ha analizado la complejidad interna existente y genera los llamados patrones de complejidad mediante el análisis detallado de los campos de complejidad y dimensiones basados en la correlación de los indicadores específicos seleccionados.
6. *Gestionado*: Las medidas son definidas e iniciadas. La organización ha definido e inicializado estrategias específicas con el fin de adaptar o dominar la complejidad interna existente.
7. *Armonizado*: La complejidad interna y externa se armonizan. La organización ha optimizado su complejidad interna de acuerdo con la complejidad externa en el mercado y es capaz de adaptarse y ajustarse permanentemente de forma dinámica.

Finalmente, el Modelo de Madurez de Ergonomía para Empresas (MMEE) [17] considera 5 niveles:

1. *Desconocimiento* (desconocen qué es la Ergonomía y cómo puede ayudar a solucionar sus problemas).
2. *Entendimiento* (reconocen que la Ergonomía puede ayudar a solucionar sus problemas).
3. *Experimentación* (están dispuestos a experimentar para probar la utilidad de la Ergonomía en la empresa).
4. *Uso regular* (la empresa usa regularmente la Ergonomía para prevenir lesiones y mejorar su desempeño).
5. *Innovador* (se ha integrado la Ergonomía a la empresa como parte de su cultura organizacional).

Los factores y elementos que considera el modelo [17] se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Factores y elementos del Madurez de Ergonomía para Empresas (MMEE) [17]

Cultura	Disposición y forma de trabajo de la empresa para el empleo de la Ergonomía.
Aceptación	Refleja la magnitud en la que las personas de la empresa aceptan la Ergonomía como una herramienta útil para la solución de problemas y la mejora en el desempeño de sus procesos.
Trabajo en equipo	Es la forma como se utiliza el trabajo en equipo en la solución de problemas de índole ergonómico en la empresa.
Integración	Grado en el que las estructuras y políticas de gestión imperantes en la empresa condicionan la introducción de la Ergonomía.
Alineación estratégica	Es la manera como la incorporación de la Ergonomía en la empresa contribuye al cumplimiento de los objetivos estratégicos.
Gestión	Es la forma de planificar, ejecutar y controlar la Ergonomía para lograr los objetivos trazados.
Compromiso	Compromiso de los altos ejecutivos de la empresa con la implementación, la promoción y el desarrollo de la Ergonomía.
Recursos	Disposición de los recursos humanos y financieros.
Ejecutores	Son las personas que ejecutan la Ergonomía (se incluyen personas externas e internas de la empresa).
Conocimientos y destrezas	Conjunto de conocimientos y destrezas de los ejecutores para implementar y desarrollar con éxito la Ergonomía en la empresa.
Responsable	Es la persona o grupo de personas responsables de la Ergonomía en la empresa.
Compensación	Estímulos morales y materiales a las buenas prácticas.
Vigilancia	Forma de recopilar, analizar e interpretar la información referente a la Ergonomía y de retroalimentar los resultados en la empresa.
Indicadores	Tipo y naturaleza de los indicadores definidos en la empresa relacionados con la Ergonomía. Modo como se usan los indicadores.
Sistemas de información	Son las tecnologías que se emplean en la empresa para investigar y detectar problemas y comunicar los resultados alcanzados acerca de la Ergonomía.
Evaluación de riesgo	Es la evaluación de la magnitud y probabilidad de los peligros existentes relacionados con la Ergonomía.

Otros modelos de madurez se presentan en la Tabla 4. Si bien estos no tienen una relación directa con la SST a partir del alcance de los requisitos asociados al SG-SST propuesto en la ISO 45001:2018 [norma técnica para la implementación de los sistemas de gestión en seguridad y salud en el trabajo en las organizaciones], se requiere vincular, entre otros aspectos, el análisis del contexto incluyendo tanto factores internos como externos a la organización, el pensamiento basado en riesgos y la gestión del cambio. Es por ello, que se describe los modelos de madurez de gestión del riesgo y de sistemas de complejidad.

Tabla 4. Modelos de madurez asociados a la gestión del riesgo y la complejidad

Autor	Denominación	Objetivo	Niveles	Descripción
Oliva [24]	Modelo de madurez de la gestión del riesgo	Identificar los principales riesgos internos de la empresa, del entorno empresarial y del entorno de valor.	5	Nivel 1: Insuficiencia en la gestión del riesgo empresarial. Nivel 2: Gestión de contingencia del riesgo empresarial. Nivel 3: Gestión estructurada del riesgo empresarial. Nivel 4: Gestión participativa del riesgo empresarial. Nivel 5: Gestión sistémica del riesgo empresarial.
Kluth, Jäger, Schatz y Bauernhansl [2]	Modelos de madurez de la gestión de sistemas de complejidad	Apoyar el análisis y la evaluación de habilidades y niveles de desarrollo de productos, procesos u organizaciones mediante la definición de diferentes niveles de madurez, a fin de evaluar hasta qué punto un objeto cumple con los requisitos cualitativos definidos.	7	1. Inicial: No comprensión de la complejidad. 2. Definida: Los campos de complejidad están definidos. 3. Cualitativa: La complejidad se evaluó cualitativamente. 4. Cuantitativa: Los indicadores claves de rendimiento son cuantitativos. 5. Analizados: se generan patrones de complejidad. 6. Gestionado: Las medidas son definidas e iniciadas. 7. Armonizado: La complejidad interna y externa se armonizan.

**La complejidad en el estudio citado es vista como la combinación de varios elementos, heterogéneos del sistema y sus interrelaciones, las cuales cambian de forma dinámica y poco comprensible.*

Otros estudios, que si bien no surgieron en el sector educativo plantean que la madurez de la gestión incluye la gestión de los riesgos [22]. Esto se debe al aumento de la competencia derivada de la globalización, por cuanto las organizaciones buscan estrategias para aumentar su complejidad interna con el fin de combatir la complejidad externa que aumenta gradualmente [23], [24]; para ello, se han planteado diversas metodologías y técnicas para la gestión de los riesgos, así como modelos para evaluar su madurez; entre estos, el propuesto por Oliva [24], quien plantea que los riesgos se deben evaluar en tres niveles: la organización, el entorno de valor y el entorno del negocio. Este modelo contempla cinco niveles:

1. *Insuficiencia en la gestión del riesgo empresarial.* Organizaciones con poca conciencia de los riesgos de esta. No hay una estructura física o conceptual dedicada a la gestión de los riesgos de la empresa. La adopción de prácticas de gestión del riesgo se produce en una forma no estructurada.
2. *Gestión de contingencia del riesgo empresarial.* Organizaciones conscientes de los riesgos a los que están sujetas. Consideran técnicas, herramientas y métodos para la gestión del riesgo. La gestión del riesgo está centralizada y se caracteriza por la baja implicación de los trabajadores en general.
3. *Gestión estructurada del riesgo empresarial.* Organizaciones con un mayor grado de gestión del riesgo empresarial. Hay un uso más intenso de las técnicas de gestión de riesgos, herramientas y métodos.
4. *Gestión participativa del riesgo empresarial.* Gestión de riesgos de la empresa, consiste en empresas con un alto nivel de conciencia y organización en relación con los procesos relacionados con la gestión del riesgo empresarial. La gestión del riesgo es más descentralizada. La comunicación es una parte integral e importante en la gestión de riesgos. La gestión del riesgo empresarial es guiada por la participación de la mayoría de los empleados.
5. *Gestión sistémica del riesgo empresarial.* Es el nivel más alto de la clasificación. En este nivel, las organizaciones tienen una gestión del riesgo empresarial consciente, organizada y transparente. Estas empresas utilizan el apoyo externo de las empresas de consultoría, socios e institutos de investigación para mejorar la gestión del riesgo. Además, la gestión de los riesgos de la compañía incluye cada vez más la evaluación de los riesgos de su entorno de valor, teniendo en cuenta que los riesgos no respetan los límites de la organización, que son soberanos con respecto a los límites de propiedad. Por lo tanto, se espera que la gestión moderna del riesgo empresarial trascienda sus prácticas más allá de los límites de la organización.

En cuanto al modelo de la gestión de sistemas de complejidad [2], se encontró que se estructura en seis niveles:

1. *Inicial:* sin comprensión de la complejidad. La compañía aún no se ha preocupado ni reconocido problemas o estrategias de complejidad.
2. *Definido:* los campos de complejidad se definen. La compañía ha identificado controladores de complejidad externa y ha establecido los campos de complejidad interna.

3. *Cualitativo*: la complejidad se evalúa cualitativamente. La compañía usa métodos para evaluar la complejidad existente dentro de los diferentes campos de complejidad, de forma cualitativa.
4. *Cuantitativo*: se elaboran los KPI cuantitativos. La compañía ha elaborado un rendimiento clave específico a través de indicadores (KPI), para cuantificar la complejidad existente en términos de las cuatro dimensiones.
5. *Analizado*: se generan patrones de complejidad. La compañía ha analizado las políticas internas existentes de complejidad y ha identificado patrones de complejidad generados por análisis detallado de los campos y dimensiones de complejidad, el cual está basado en la correlación de indicadores específicos seleccionados.
6. *Administrado*: las medidas se definen e inician. La compañía ha definido e iniciado estrategias específicas para adaptarse o dominar la complejidad interna existente.
7. *Armonizado*: la complejidad interna y externa son armonizadas. La compañía ha optimizado su complejidad interna de acuerdo con la complejidad externa del mercado y la organización puede adaptarla y ajustarla de forma dinámica y permanente.

4. CONCLUSIONES

Se identificaron 10 modelos de madurez, ocho modelos enfocados a la cultura de seguridad, a los procesos de la gestión de la seguridad y salud en el trabajo, a la madurez de la gestión organizativa de la SST, al proceso de aprendizaje en SST, a la integración de los estándares del sistema de gestión de seguridad en la industria minera y la implementación de programas ergonómicos y dos dirigidos a la gestión del riesgo y la complejidad. Cabe precisar que son pocos los modelos desarrollados, ninguno de ellos se ha desarrollado para el sector servicios entre ellos, el sector salud y el sector educativo.

Adicionalmente, dado los cambios que han tendido los SG-SST en las últimas tres décadas y cambios inminentes que la ISO 45001: 2018 [norma técnica para la implementación de los sistemas de gestión en seguridad y salud en el trabajo en las organizaciones], se requiere de la comprensión de los modelos de madurez de la gestión de la SST existentes así como el desarrollo de nuevas propuestas que den respuesta a los nuevos requisitos que plantea esta norma entre ellos, el análisis de contexto, el liderazgo y la participación de trabajadores, la gestión del cambio, el pensamiento basado en riesgos.

Los modelos de madurez de la gestión de la SST les permiten a las organizaciones comprender su nivel de desarrollo en este tema y además identificar las brechas para la mejora de la gestión. De esta manera, las organizaciones podrán transitar de un nivel básico, o como en el Colombia se ha denominado de estándares mínimos, a un nivel superior de gestión en el que verdaderamente se fomente una cultura positiva de seguridad y salud y se articule en la gestión de la organización. Lograr dicha articulación es indispensable dado que las organizaciones cada día son más complejas y requieren dar respuesta a las necesidades de todas sus partes interesadas pertinentes a su objeto de negocio. Además, los modelos de madurez ayudan a precisar las variables de predicción y las metas cruciales a trabajar en periodos determinados para así cumplir con los propósitos de los SG-SST: fomentar la seguridad y proteger la salud de la población trabajadora.

Finalmente, esta revisión de modelos de madurez mostró que las propuestas desarrolladas hasta el momento son limitadas para sectores y contextos específicos. En este sentido, se requiere profundizar y desarrollar investigaciones que propongan y validen nuevos modelos que integren los aspectos esenciales de la SST, el análisis de contexto interno y externo de la organización, elementos de aprendizaje organizacional en SST, la gestión del riesgo, el liderazgo, la participación, la comunicación, entre otros.

REFERENCIAS

- [1] Y. Rodríguez, X. Pedraza and J. Martínez, "Evaluación de la madurez de la gestión de la seguridad y salud en el trabajo: revisión de literatura", *SIGNOS - Investigación en sistemas de gestión*, vol. 9, no. 1, pp. 113-127, 2017.
- [2] A. Kluth, J. Jäger, A. Schatz and T. Bauernhansl, "Evaluation of Complexity Management Systems – Systematical and Maturity-based Approach", *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 224-229, 2014.
- [3] A. Ruíz, en *Texto, testimonio y metatexto: El análisis de contenido en la investigación en educación*, 1st ed., Bogotá: UPN, Universidad Pedagógica Nacional, 2004, pp. 44-59.
- [4] T. Ferreira and C. Simões, "Assessment of Maturity in Project Management: A Bibliometric Study of Main Models", *Procedia Computer Science*, vol. 55, pp. 92-101, 2015.
- [5] J. Domingues, P. Sampaio and P. Arezes, "A model for assessing maturity of Integrated Management Systems", *Occupational Safety and Hygiene II*, pp. 341-346, 2014.
- [6] E. Perez, I. Pérez and Y. Rodríguez, "Modelos de madurez y su idoneidad para aplicar en pequeñas y medianas empresas", *Ingeniería Industrial*, vol. 35, no. 2, pp. 184-198, 2014.
- [7] L. Dos Santos, F. Gonçalves and P. Arezes, "A proposed model for maturity evaluation of health and safety management systems", en *Reliability, Risk and Safety: Back to the Future*, 1st ed., Taylor & Francis, 2010, pp. 2155-2162.
- [8] R. Portella, V. Gonçalves, M. Rösing and S. Portella, "Modelo de madurez en gestión para organizaciones del tercer sector", *Revista del CLAD Reforma y Democracia*, vol. 66, no. 1, pp. 195-224, 2016.

- [9] J. Domingues, P. Sampaio and P. Arezes, "Maturity models: a useful solution to assess current OHS management system". Institution of Occupational Safety and Health, 2019, pp. 114-115.
- [10] M. Moumen and H. El Aoufir, "Evaluation of Maturity Level of QSE Management Systems: Empirical Analysis, Case of Moroccan Companies", *Modern Applied Science*, vol. 10, no. 5, p. 10, 2016.
- [11] Fleming, M. "Safety Culture Maturity Model"; Preparado para *The Keil Centre for the Health and Safety Executive, Offshore Technology Report 2000/049*; Offshore Technology Report-Health and Safety Executive OTH:Norwich, UK, 2000.
- [12] D. Cliff, "The Management of Occupational Health and Safety in the Australian Mining Industry". *Crawley: International Mining for Development Centre*, 2012.
- [13] M. Favalo and E. Drajs, "Implementación de los sistemas de gestión de salud y seguridad en el trabajo", Ponencia para la *Fifth International Conference on Occupational Risk Prevention*, Santiago de Chile, 2007.
- [14] Agencia Europea de Seguridad y Salud en el Trabajo. "Mainstreaming OSH into business management." 2010 [Online]. Disponible en: https://osha.europa.eu/en/publications/reports/mainstreaming_osh_business
- [15] A. Filho, J. Andrade and M. Marinho, "A safety culture maturity model for petrochemical companies in Brazil", *Safety Science*, vol. 48, no. 5, pp. 615-624, 2010.
- [16] P. Foster and S. Hoult, "The Safety Journey: Using a Safety Maturity Model for Safety Planning and Assurance in the UK Coal Mining Industry", *Minerals*, vol. 3, no. 1, pp. 59-72, 2013.
- [17] Y. Rodríguez, E. Perez and R. Montero, "Modelo de Madurez de Ergonomía para Empresas (MMEE)", *El Hombre y la Máquina*, vol. 40, pp. 22-30, 2012.
- [18] Y. Rodríguez Y. and E. Pérez E., "Diagnóstico macroergonómico de organizaciones colombianas con el Modelo de madurez de Ergonomía", *Ciencias de la Salud*, vol. 14, no., pp. 11-25, 2016.
- [19] E. Drajs, M. Favaro, G. Obertin, " Les systèmes de management de la santé sécurité en entreprise, caractéristiques et conditions de mise en œuvre, *INRS, Département homme au travail, Laboratoire Gestion de la sécurité, Juillet 2008*.
- [20] J. Molano and N. Arévalo, "De la salud ocupacional a la gestión de la seguridad y salud en el trabajo: más que semántica, una transformación del sistema general de riesgos laborales", *Innovar*, vol. 23, no. 48, pp. 21-32, 2013.
- [21] P. Hudson, "Applying the lessons of high risk industries to health care", *Quality and Safety in Health Care*, vol. 12, no. 90001, pp. i7-i12, 2003.
- [22] R. Salawu and F. Abdullah, "Assessing Risk Management Maturity of Construction Organisations on Infrastructural Project Delivery in Nigeria", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 172, pp. 643-650, 2015.
- [23] M. Wibowo and R. Waluyo, "Knowledge Management Maturity in Construction Companies", *Procedia Engineering*, vol. 125, pp. 89-94, 2015.
- [24] F. Oliva, "A maturity model for enterprise risk management", *International Journal of Production Economics*, vol. 173, pp. 66-79, 2016.

Referentes conceptuales de transferencia de conocimiento y tecnología en Instituciones de Educación Superior: Una revisión sistemática de la literatura

Neira Y. Figueroa G.¹

Lizeth F. Serrano C.²

Hugo F. Castro S.³

^{1,3} Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

² Universidad Católica de Colombia

La transferencia de conocimiento y tecnología es uno de los procesos fundamentales dentro de las Instituciones de Educación Superior (IES) que quieren aportar al desarrollo económico, social e industrial de su entorno y además cumplir con su tercera misión que es la transferencia y divulgación de conocimiento. El objetivo de este capítulo es identificar el concepto de transferencia de conocimiento y tecnología en la literatura internacional. Con este propósito se realizó una revisión sistemática de literatura en una ventana de tiempo comprendida entre los años 2002 a 2018 en la base de datos Web of Science, y un análisis de tendencias sobre el tema apoyado en el software de minería de datos Vosviewer®. El análisis de tendencias permitió identificar que el estudio de este tema es de creciente interés tanto desde la perspectiva académica, como desde la perspectiva práctica, donde se requiere materializar la transferencia de conocimiento y tecnología en iniciativas estratégicas lideradas por las IES. Adicionalmente, se encontró que los conceptos de transferencia de conocimiento y tecnología en el contexto de las IES se han abordado desde múltiples definiciones en la literatura, donde algunos autores, sugieren entenderlos desde perspectivas diferenciadas, mientras otros coinciden en utilizarlos de forma indistinta para hacer referencia al proceso donde la sociedad se beneficia del conocimiento y de los desarrollos generados en esta dinámica. Finalmente, se identificó como relevante la profundización en modelos de transferencia de conocimiento y tecnología que se fundamenten en la coherencia con los retos y capacidades institucionales, a la vez que se orientan al desarrollo de capacidades de emprendimiento en su comunidad académica.

1. INTRODUCCIÓN

La tercera misión de las universidades después de la docencia e investigación es la difusión y divulgación de conocimiento [1], [2], [3], [4], en ese sentido la transferencia de conocimiento y tecnología se entiende como un proceso de divulgación de conocimiento y tecnología desde las Instituciones de Educación Superior (IES) hacia la industria o hacia la sociedad, con el fin de aportar a la generación de soluciones a las necesidades de su entorno [5]–[7] y de ser posible permitirle a las universidades acceder a nuevas fuentes de financiación a través de resultados de investigación que puedan ser comercializados en el mercado como resultado de iniciativas de emprendimiento [8], [9], [10].

Al analizar el concepto de transferencia de tecnología, se encontró que se ha abordado desde múltiples definiciones, según la disciplina y el propósito de las diversas investigaciones generadas en el campo de conocimiento, haciendo evidente que la búsqueda de una definición canónica es inútil [11]. Así mismo, se evidenció que la transferencia de conocimiento no es un concepto homogéneo, sino que puede presentarse dentro de una serie de rutas formales e informales [12]. Teniendo en cuenta la complejidad en el entendimiento del concepto desde la literatura previamente publicada, se identificó la necesidad de desarrollar esta investigación para abordar desde una perspectiva rigurosa y sistemática, el análisis de la literatura asociada a la “transferencia de conocimiento y tecnología”.

La revisión de literatura es considerada una síntesis de carácter informativo, crítico y útil sobre un tema de interés, permite analizar y evaluar el espacio intelectual que existe, identificar lo conocido y desconocido sobre la temática y las áreas de controversia o debate. Contribuye a la formulación de nuevas preguntas de investigación derivadas de los aportes de investigaciones precedentes, facilitando así el desarrollo del conocimiento existente [13], [14]. La revisión de literatura es ampliamente utilizada en procesos de investigación y se puede subdividir en dos campos, revisión narrativa, que trata amplios temas que se relacionan con un tópico determinado en lugar de abordar un tema particular en profundidad, y revisión sistemática, que consiste en una investigación científica en sí misma, que se realiza con métodos preplanificados y estrategias que limitan el sesgo y el error [15].

Para lograr el objetivo de este capítulo, se utilizó la metodología de revisión sistemática de literatura propuesta por Tranfield en el 2003 [13]. El proceso de selección de artículos se apoyó en la herramienta web Tree of Science (TOS) de la universidad Nacional de Colombia sede Manizales, el análisis de contenido se apoyó en el software MaxQDA® y se complementó con un análisis de tendencias elaborado en el software Vosviewer®.

2. MÉTODO

La revisión sistemática de literatura es “un método de investigación en sí mismo que deriva sus resultados de los datos ya descritos en la literatura publicada” [16], usa un algoritmo explícito y opuesto a una heurística para realizar

¹ neira.figueroa@uptc.edu.co

² lfserranoc@ucatolica.edu.co

³ hugofernando.castro@uptc.edu.co

una búsqueda y mejorar la calidad del proceso de revisión y de consolidación de resultados. Su principal ventaja es que usa un procedimiento transparente y reproducible [13]. Sin embargo, los principales desafíos de esta metodología se encuentran en la dificultad de síntesis de los datos de diversas disciplinas, la insuficiente representación de libros y la existencia de un amplio volumen de información por analizar [17]. Se consideró importante utilizar la metodología de revisión sistemática para la conceptualización de la transferencia de conocimiento y tecnología por la amplitud y orden que se le confiere a la búsqueda del tema de interés.

Tranfield, plantea tres etapas o fases para realizar una revisión sistémica: planificación de la revisión, realización de la revisión; y reporte y difusión de resultados [13], estas etapas son similares en contenido a las tres fases que plantea Gupta en su propuesta metodológica: pasos preparatorios, búsqueda de literatura y análisis [18]. Para este estudio, se consideró como referente las tres etapas propuestas Tranfield, que se detallan a continuación.

2.1 Planificación

Teniendo en cuenta que el objetivo de la revisión sistemática de literatura fue identificar el concepto de transferencia de conocimiento y tecnología en el contexto de las IES, se estableció un protocolo de búsqueda que incluyó la definición de palabras claves como: transferencia de conocimiento, transferencia de tecnología, transferencia de conocimiento y tecnología desde las universidades o Instituciones de Educación Superior, academia, universidad y resultados de investigación. Con las palabras clave antes descritas, se construyó la siguiente ecuación de búsqueda: ("technology transfer" OR "knowledge transfer" OR "TKT" OR "KTT" OR "research results") AND (universit* OR "academy" OR "IES" OR "Higher Education Institutions" OR "HEIs"), y se aplicó en la base de datos: Web of Science.

2.2 Desarrollo

En esta revisión se seleccionó el periodo de tiempo 2002 a 2018, para la aplicación de la ecuación de búsqueda, se utilizó inicialmente el filtro TEMA encontrando 2931 resultados, luego se refinó la búsqueda con el filtro TÍTULO, obteniendo 248 resultados. Posteriormente, se utilizó la Herramienta TOS, que permitió descartar 168 artículos. Así, se seleccionaron 80 artículos, que fueron revisados por título y resumen para analizar su pertinencia en relación con el objeto de estudio. Como resultado del proceso, se seleccionaron 30 artículos como objeto de revisión exhaustiva. Se agregaron nueve artículos por bola de nieve, obteniendo un total de 39 documentos. El proceso anterior se puede observar en la Figura 1.

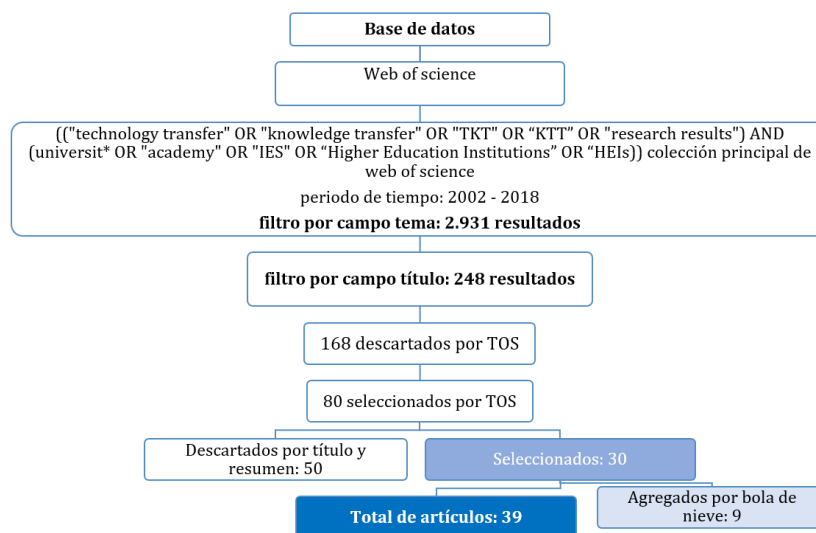


Figura 1. Desarrollo de la revisión de literatura

2.3 Publicación de resultados

Para el análisis de contenido de los 39 artículos resultantes del proceso de filtrado, se utilizó el software de análisis cualitativo de datos MaxQDA®, que permitió codificar los resultados de la revisión en categorías analíticas que facilitaron la estructuración de los resultados que se presentan a continuación en este documento.

3. RESULTADOS

3.1 Conceptualización: Transferencia de Conocimiento y Tecnología

Una vez revisados los conceptos de la literatura, se encontraron algunas convergencias y divergencias en las definiciones. Para algunos autores, la “transferencia de conocimiento y tecnología” se debe entender como dos

conceptos diferentes “transferencia de conocimiento” y “transferencia de tecnología” donde cada palabra se define de forma diferente (ver ejemplos en Tabla 1), para otros autores las dos palabras claves dependiendo el contexto, se pueden considerar como sinónimos al ser conceptos con una fuerte interrelación y ampliamente utilizados como términos intercambiables [19], [20], [21]. Para otros autores, la transferencia de conocimiento y tecnología son dos conceptos inseparables, donde uno requiere del otro, esto se evidencia cuando un producto tecnológico se difunde el conocimiento en el que se basa también se difunde, siendo en este caso la base de conocimiento inherente y no auxiliar y por otro lado cuando se realiza transferencia de tecnología se requiere crear y adoptar conocimiento y ese proceso por lo general implica el uso de tecnología [22], [23].

Al realizar una comparación entre los dos términos, tomándolos por separado, se encuentra que desde la perspectiva académica el término transferencia de conocimiento se ha establecido como un concepto más amplio en comparación con la transferencia de tecnología, que está más enfocada a la gestión de la propiedad intelectual [24]. La transferencia de conocimiento no es un concepto homogéneo, sino que puede presentarse dentro de una serie de rutas formales como informales [12]. La transferencia de tecnología se refiere a un conjunto de actividades más limitadas en comparación con la transferencia de conocimiento [23].

Existen otros autores que desde el punto de vista académico y en el contexto de las IES no hacen mayor distinción entre transferencia de conocimiento y tecnología, sino que se refieren en conjunto a la transferencia de resultados de investigación y lo hacen desde el enfoque de la tercera misión de las universidades que consiste en transferir y divulgar el conocimiento, como tercer propósito después de las misiones tradicionales de docencia e investigación [1], [2], [3], [4]. Considerando lo anterior, la transferencia de conocimiento a nivel general se podría definir conceptualmente como un proceso impulsor de las interacciones entre las universidades, la economía, y la sociedad, para que el conocimiento sea más eficaz o “útil” y tenga la capacidad de generar valor económico, social y de desarrollo industrial [25], [26]. En este contexto, la transferencia de tecnología podría entenderse como un proceso donde la investigación universitaria genera valor a partir de sus interacciones con redes de actores externos [27], [28], [29], [30]. Se espera que, de estas interacciones, en especial aquellas generadas con la industria [27] se desarrollen tecnologías objeto de comercialización [28], [29], [23], [30], y patentabilidad [28], [23], [31]. Respecto al concepto de transferencia de conocimiento se podría definir como el proceso de transmitir conocimiento útil, a actores que lo requieran para tomar decisiones [23], [32], [33].

El ejercicio de revisión permitió la construcción de un entendimiento del concepto de transferencia de conocimiento y tecnología como el proceso de difusión y divulgación de conocimiento desde las IES hacia la sociedad y la industria, con la capacidad de generar valor económico y social, que se traduzca en aportes a la competitividad industrial a través de la innovación. La Tabla 1 sintetiza algunos de los aportes de los autores revisados.

3.2 Prácticas de referencia para el proceso de transferencia de tecnología

Con el modelo de la Triple Hélice [46], se articuló en un solo espiral de innovación a tres actores fundamentales del proceso innovador, la universidad, la industria y el estado. Dentro de este modelo, las universidades tienen un rol de liderazgo, evidenciando a su vez, el reto que estas instituciones asumen de dinamizar tanto el ejercicio de producción de conocimiento como en el ejercicio de hacer que este conocimiento genere impacto en la sociedad. Se encontró que la transferencia se puede realizar de manera formal e informal e incluye distintos canales para el proceso como patentes, consultorías, publicaciones científicas, presentaciones académicas, contratos de investigación, investigación colaborativa entre otros [36], [39]. Para la labor de transferencia, la mayoría de las universidades cuenta con Oficinas de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI), cuyo objetivo es conectar las necesidades de la industria con las producciones de investigación de las universidades para generar soluciones pertinentes antes las realidades del entorno [1], [2].

Dependiendo de la intensidad de generación de resultados de investigación de cada universidad, de su infraestructura y de la mezcla de otros factores se podrán realizar procesos de transferencia que incluyan la comercialización de resultados de investigación y la generación de espacios de emprendimiento universitario que dinamicen la transferencia. Sin embargo, todos los países no son iguales y las prácticas que son exitosas en algunos países no pueden replicarse sin contextualización en otros. Lo anterior hace que el proceso de transferir sea complejo y que la identificación de prácticas de referencia permita aportar a la reducción de la curva de aprendizaje de las IES que asuman el reto de generar valor a través de sus iniciativas de investigación [37].

Aunque la universidad realiza de distintas formas el proceso de transferencia de conocimiento y tecnología, se encontró que está más estructurado el proceso de transferir tecnología, debido a que las invenciones a transferir casi siempre son comercializables, protegibles con mecanismos de propiedad intelectual y los procesos dentro de la OTRI para este tipo de transferencia son similares con los de otras IES que transfieren tecnología. Por lo anterior, a continuación, se presenta una descripción del entorno de las OTRI's y posteriormente, en la Figura 2 se presenta el proceso de transferencia desde la perspectiva de las OTRI's.

Tabla 1. Conceptualización de transferencia de conocimiento y tecnología desde algunos autores revisados

Transferencia de conocimiento	
La transferencia de conocimiento es una serie de actividades que nutre la toma de decisiones [23].	Landry 2006
La transferencia de conocimiento se refiere a la transmisión de conocimiento de un lugar, persona o propiedad a otro, la transferencia exitosa de conocimiento significa que la transferencia resulta en la creación exitosa y la aplicación del conocimiento en las organizaciones [32].	Liyanage, 2009
La transferencia de conocimiento se conceptualiza como el proceso para capturar, recopilar y compartir el conocimiento explícito y tácito, incluidas las habilidades y competencias, a través de actividades comerciales y no comerciales como las colaboraciones de investigación, consultoría, concesión de licencias, creación de spin-off, movilidad de investigadores, publicación, etc. [24].	Serbanica 2015, citando EC COM, 2007, p. 182
La transferencia de conocimiento ha sido institucionalizada como la tercera misión para las universidades [3][4].	Lockett, 2014; Pinheiro, 2015 Laredo, 2007 Etzkowitz, 2000
Las actividades de transferencia de conocimiento son de naturaleza suave, manifestándose en forma de conferencias, talleres, publicaciones y consultoría [33].	E. Sá, D. Dias, 2018
La transferencia de conocimiento es la comercialización de la investigación pública de las universidades y la investigación pública de las organizaciones (PROs), para generar valor económico, social y desarrollo industrial [26].	OECD, 2013
La transferencia es el paso de la tecnología y el conocimiento de una organización a otra [11].	Bozeman, 2000
La transferencia de conocimiento se puede definir a nivel general como el impulso para aumentar interacciones entre las universidades, la economía y la sociedad, para que el conocimiento sea más eficaz o "útil" [25].	Wersun, 2010
Transferencia de tecnología	
La transferencia de tecnología universitaria es el proceso donde las tecnologías se originan en las universidades y en última instancia son utilizadas por la industria [27].	Siegel, 2004
La transferencia de tecnología se refiere al proceso mediante el cual la invención o propiedad intelectual de la investigación académica se otorga bajo licencia o se transmite a través de los derechos de uso de una entidad con fines de lucro y, finalmente se comercializa. Este proceso toma varios pasos [28].	Friedman, 2003
La transferencia de tecnología es el proceso de transformación de la investigación universitaria en productos comercializables [29].	Powers, 2003
La transferencia de tecnología es un constructo que se refiere a la instrumentalidad del conocimiento, a conjuntos de herramientas tangibles almacenadas en planos, bases de datos, manuales y otras formas de documentos como las patentes. Estos atributos transforman la tecnología en productos que son fácilmente susceptibles de transacciones comerciales [23].	Landry, 2006
La transferencia de tecnología universitaria es el proceso de transferencia, conversión y comercialización de la investigación básica realizada en las universidades como nuevas tecnologías [30].	Siegel, 2007
La transferencia de tecnología se refiere más estrechamente a la concesión de licencias de invenciones patentadas o protegidas y al espíritu empresarial académico [31].	Perkmann, 2013
La transferencia de tecnología universitaria es mucho más compleja y multifacética que la actividad de patentamiento y la creación de nuevas empresas, porque incluye también el desbordamiento de conocimiento y actividades docentes [34].	Baglieri, 2018
La transferencia de tecnología se refiere a transacciones o colaboraciones que se realizan a largo plazo entre los que adquieren y proveen tecnología [35].	Moortel, 2018
La transferencia de tecnología de la universidad a la industria se conoce como la transferencia de invenciones de científicos académicos a empresas privadas con fines de comercialización [36].	ALAVI (2016)



Figura 2. Etapas del proceso de transferencia de tecnología [37]

De acuerdo con las limitaciones de recursos de las OTRI's, la mayoría de estas oficinas sólo invierte en mecanismos de protección de propiedad intelectual de invenciones con alto valor comercial o impacto social. Los criterios que las OTRI's utilizan para evaluar las invenciones son diferentes en cada oficina pues van ligados a aspectos como la misión, las políticas, la estructura de la oficina y las prioridades estratégicas de cada institución de educación superior. A pesar de estas diferencias, se encuentran convergencias en algunas prácticas del proceso de evaluación que estas oficinas realizan y que están a su vez relacionadas con temas de propiedad intelectual [37] y se describen a continuación.

proteger con mecanismos de propiedad intelectual adecuados las invenciones que así lo requieran. Es así como llegar al proceso de comercialización para las IES, requiere de varios procesos previos que propendan por maximizar los beneficios de los actores involucrados en transferir.

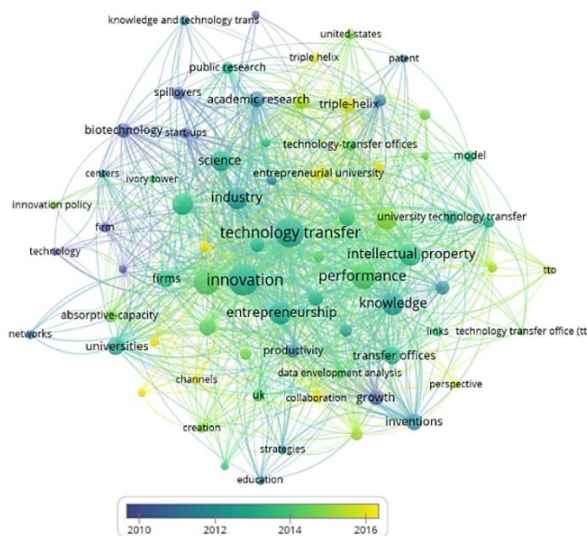


Figura 4. Mapa de tendencia de relación de las palabras claves asociadas a la ecuación de búsqueda

- Transferencia de conocimiento.** La transferencia de conocimiento es un concepto amplio, desde el enfoque universitario puede incluir varias clasificaciones y puede presentarse como transferencia formal e informal dependiendo los autores que la definan. Existe una variedad de canales para transferir conocimiento que de forma tradicional incluye: publicaciones, conferencias, consultorías, contratos con la industria y/o colocación de estudiantes y normas; de forma menos tradicional: investigación colaborativa, asociaciones de investigación tecnológica, investigación por contrato, patentes y licencias, compañías spin-offs y compañías formadas por estudiantes y exalumnos con conocimientos en investigación [40]. La transferencia de conocimiento es un tema emergente, porque adicional a que va de la mano con la economía actual del conocimiento y con la innovación, les permite a las universidades ir más allá de la docencia e investigación y llevar los resultados de la investigación a entornos como la industria y la sociedad, para promover el desarrollo, la competitividad y la innovación.
- Emprendimiento universitario.** El emprendimiento universitario es un proceso que se genera a partir de la iniciativa de personas con previa experiencia en emprendimiento, con habilidades basadas en conocimiento y con aspiraciones de empezar una firma [41]. También se entiende como una actividad de comercialización que se realiza fuera de los deberes ya conocidos de investigación y enseñanza básica universitaria [33], [42]. El emprendimiento universitario surge como una respuesta al desarrollo institucional y genera ingresos financieros que incrementan los recursos: y reducen en algunos casos, de universidades públicas, la dependencia del gobierno [43], [44], este emprendimiento puede darse a través de la interacción de la investigación, la enseñanza y las dinámicas de transferencia de conocimiento [45]. Finalmente, se encuentra que la definición de emprendimiento universitario ha sido descrita como “difícil y controversial” al no existir una única definición para el concepto [46].
- Triple Hélice.** Triple Hélice es un término desarrollado por Etzkowitz y Leydesdorff [47], que incluye a la universidad, la industria y el gobierno como instituciones cuya interrelación ayuda con la construcción de una infraestructura de conocimiento y promueve la innovación en diversos niveles [48]. La Triple Hélice fomenta el emprendimiento universitario y su infraestructura facilita el desarrollo de iniciativas como incubadoras y servicios de conexión que potencializan la innovación [49]. El modelo Triple, es una triada capaz de potencializar el desarrollo económico y social. La evolución de los sistemas de innovación ha pasado por tres enfoques, en la Figura 5, se representa la evolución de los sistemas de innovación que involucran la relación: universidad – industria - estado.

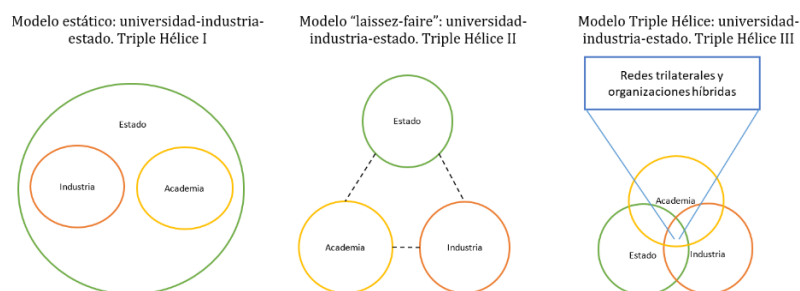


Figura 5. Evolución de sistemas de innovación que involucran la relación de universidad-industria-estado [6]

Se observa la Triple Hélice I, con un control jerárquico del Estado que genera un modelo estático para el fomento de la innovación y el desarrollo, en la Triple Hélice II, se mejora la interacción entre los tres actores pero con el principio de las políticas laissez-faire toma relevancia el papel de la Industria y en segundo plano queda la Universidad y el Estado y en el Triple Hélice III, se integra armónicamente los tres actores de forma individual y global para potencializar la generación de conocimiento, difusión y explotación. De la Triple Hélice III y la interacción de los tres actores surgen oficinas híbridas de apoyo a la innovación, denominadas comúnmente como Oficinas de Transferencia de Resultados de Investigación, cuya misión principal es transferir los resultados de investigación generados por los actores universidad-industria-estado [6].

3.3.3 Relación de co-citación

En la relación de co-citación (Figura 6) se identifica que el autor más citado es Siegel (2003), quien en la evaluación del impacto de las prácticas organizacionales en relación con las oficinas de transferencia plantea que el éxito de la transferencia de tecnología universitaria puede ser un factor crítico para sostener la competitividad global de las empresas, e identifica que los factores organizativos más críticos son los sistemas de recompensa del profesorado, las prácticas de incentivos del personal y las barreras culturales entre universidades y empresas [50]. En el ejercicio de análisis de co-citación se encontró que, sobre la temática, algunos de los autores más destacados son: Etzkowitz, 2000; Siegel DS, 2004; Bozeman, 2000; D'este 2007; Friedman, 2003; Chapple, 2005; Thursby, 2002 y Di Gregorio, 2003.

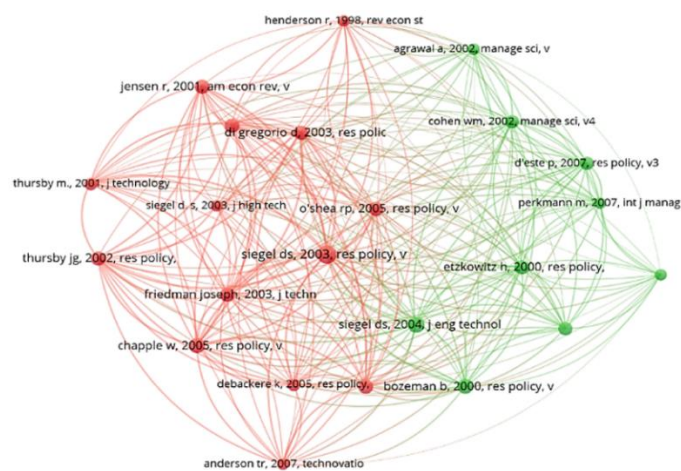


Figura 6. Mapa de relación de co-citación asociada a los resultados de la ecuación de búsqueda

3.3.4 Publicaciones por año

Respecto a los 248 artículos encontrados con la ecuación de búsqueda, se encontró en la base de datos Web Of Science que la dinámica de publicación por año sobre el tema de transferencia de conocimiento y tecnología presenta una tendencia creciente (Figura 7) en los últimos 15 años. Se identificó que el mayor número de publicaciones se realizó en el año 2016 y que para los años 2017 y 2018 la dinámica de publicación ha disminuido con respecto al año 2016 pero sigue siendo creciente en relación con el resto de los años. Lo anterior indica que en la literatura el tema de transferencia de conocimiento y tecnología sigue vigente y que genera el desarrollo de nuevos documentos de carácter científico.

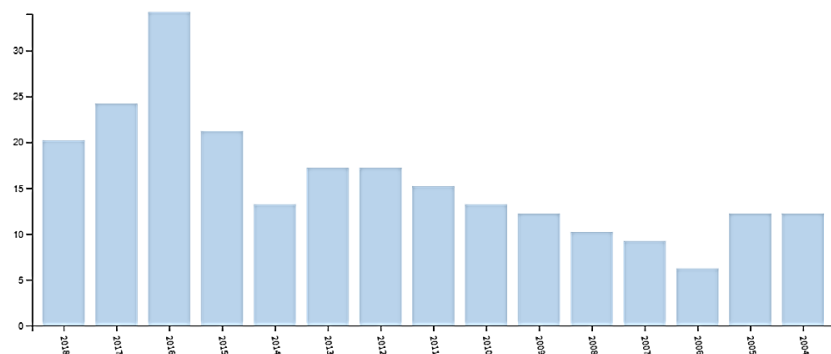


Figura 7. Publicaciones por año en la base de datos Web of Science sobre Transferencia de conocimiento y Tecnología

4. DISCUSIÓN

El proceso de revisión de literatura permitió identificar diferentes aportes sobre las definiciones de transferencia de conocimiento y tecnología, así mismo, permitió la identificación de tendencias de interés para la academia, de estas

últimas se podrían formular preguntas que se orienten a desarrollar aún más el conocimiento. Teniendo en cuenta que, dentro de la revisión de literatura con la ecuación de búsqueda definida, se encontró que son escasas las publicaciones en la base de datos Web of Science (WOS) sobre estudios de transferencia de conocimiento y tecnología desde las IES pertenecientes a los países latinoamericanos, se plantean tres preguntas de investigación que se deberían abordar desde países de esta región para identificar las tipologías de resultados de investigación y desarrollar estrategias adecuadas que conlleven a procesos de transferencia exitosos: 1) ¿Cómo se podría realizar la transferencia de conocimiento desde las IES?, 2) ¿Cómo se podrían comercializar los resultados de investigación de las IES? Y 3) ¿Cómo se podría realizar emprendimiento académico desde las IES?

Adicional a lo anterior y observando el contexto presentado en el documento, se puede concluir que la creciente necesidad de innovación para la mejora en la competitividad de los países, evidencia a su vez, la relevancia de la generación de procesos de transferencia donde se generen redes de conocimiento que permitan dar respuestas conjuntas y aceleradas a las problemáticas complejas que caracterizan las actuales dinámicas de transformación [51]. Así, se encuentra que los procesos de transferencia favorecen principalmente a los países que logran desarrollar estrategias adecuadas para llevar el conocimiento y la tecnología al mercado y a la sociedad, pues de esta manera se potencializa el desarrollo económico, social, industrial y tecnológico de las regiones y países [5]–[7], pero principalmente genera impactos relevantes en los entornos más cercanos a las IES [52], [53].

Se destaca, que hasta ahora los estudios sobre el desempeño de las IES en términos de transferencia se han centrado en la comercialización de patentes y la contratación de la investigación con la industria pero cada día se está reconociendo una mayor participación de las IES en actividades de una gama más amplia de transferencia como la consultoría, la participación pública y la prestación de servicios intensivos en conocimiento, razón por la que también se ha encontrado que ya no se cataloga la intensidad de la investigación como un predictor de peso en la eficiencia de la transferencia [54] y que dicha eficiencia también presenta variaciones de una universidad a otra, según las características y prioridades de cada institución [55].

El hecho de que países como Suiza, Suecia, y Países Bajos clasificados en ingreso alto según el Banco Mundial en informe de 2017, se destaquen en innovación [56], y a su vez tengan un buen índice de Desarrollo Humano, los convierte en un modelo de países a seguir, sobre todo por países con nivel de ingreso medio-alto y bajo que anhelan mejorar su desarrollo económico y social. Sin embargo, las capacidades competitivas de los países de ingreso medio-alto y bajo son inferiores, y una de las alternativas para potencializarlas es a través de la generación y transferencia de conocimiento desde las IES.

En este sentido, desde la literatura se encuentran distintos modelos de innovación que apuntan a la comercialización [57], [6] y se identifican múltiples mecanismos de transferencia de resultados de investigación, sin embargo, se identifica que el principal obstáculo para utilizar los mecanismos y transferir exitosamente, es el hecho de que en la mayoría de países con nivel de ingreso medio-alto, no se han diseñado estrategias de transferencia que se ajusten a la realidad y contexto de cada región, sino que al parecer se han seguido los mecanismos de países más desarrollados como Estados Unidos y el resultado no ha sido el mejor [58].

Con la tendencia de innovación hacia un enfoque de apertura, servitización y digitalización [59], los países con nivel de ingreso medio-alto tienen el reto de iniciar a hacer uso del conocimiento, como ventaja competitiva y de sostenibilidad, dado que la industria conformada por mano de obra operativa se va a ver afectada en su gran mayoría con el tema de la digitalización.

En el caso de América Latina, la innovación se representa de forma heterogénea pues, aunque países como Brasil y México se destacan un poco más, hay otros que realmente no tienen ningún reconocimiento [60], [61]. Por otra parte, las IES de estos países muchas veces generan las soluciones idóneas y las tecnologías que su industria necesita, pero los resultados de investigación se quedan en las IES y no son transferidos a la sociedad [58]. Las IES han diseñado múltiples modelos para transferir conocimiento, sin embargo, como el tema de transferencia es emergente para muchas universidades pertenecientes a estos países, los modelos que han diseñado no han sido efectivos pues no se ven reflejados en los desarrollos de estas regiones, encontrándose múltiples barreras para realizar la transferencia [62].

Finalmente, se encontró que los autores revisados han planteado la necesidad de realizar estudios sobre transferencia para ver perspectivas alternas sobre el tema que permitan entender mejor su naturaleza multifacética [63], así mismo se ha planteado la necesidad de diseñar modelos y metodologías que se adapten a la cultura y particularidades de cada región [10], [58].

5. CONCLUSIONES

Con la transferencia de conocimiento y tecnología, las universidades realizan un aporte significativo al desarrollo económico, social e industrial de las regiones más cercanas a su entorno, con esta actividad promueven la innovación,

se hacen participes activas en la solución de los problemas reales de la sociedad y pueden optar por emprender y comercializar resultados de investigación en forma de productos derivados de los resultados de investigación. Por lo anterior, se destacan dos términos fundamentales para el proceso de transferencia, “la tercera misión” de las universidades que enfoca a las IES hacia la transferencia y “la triple hélice”, modelo que destaca el papel de las IES cómo actores dinamizadores del proceso de transferencia en los ecosistemas de innovación.

En el proceso de conceptualización del término “transferencia de conocimiento y tecnología”, se encontró que en la literatura existen múltiples percepciones en cuanto a la definición, y que para usar los términos más apropiados se debe estudiar la disciplina o el área desde donde se va a abordar el concepto. En términos de tendencias, se encontró que la transferencia de conocimiento y tecnología desde las universidades es un tema de interés creciente, que en la actualidad tiende a la comercialización de resultados de investigación universitaria y a la generación de emprendimientos universitarios.

La revisión conceptual que se realizó se limitó a analizar el entendimiento de la transferencia de conocimiento y tecnología desde las universidades; sin embargo, existen otros enfoques bajo los cuales la conceptualización podría presentar variaciones. Considerando lo descrito, se espera que con la presente revisión conceptual se observen algunas de las múltiples definiciones del concepto estudiado de tal forma que se tenga en cuenta estas percepciones de autores al momento de emprender futuras investigaciones sobre el tema. Se sugiere desarrollar revisiones conceptuales adicionales sobre la temática con el fin de aportar mayor robustez al concepto, del mismo modo se sugiere abordar a profundidad los temas que surgieron como tendencia, que hacen referencia a la comercialización, la transferencia de conocimiento, el emprendimiento universitario y la triple hélice. Finalmente, se sugiere como necesario, que futuros estudios se orienten al diseño de modelos de transferencia que se ajusten a las características de las IES y que incluyan las tendencias identificadas en esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] P. Laredo, “Revisiting the Third Mission of Universities: Toward a Renewed Categorization of University Activities?” *High. Educ. Policy*, vol. 20, no. 4, pp. 441–456, 2007.
- [2] H. Etzkowitz, A. Webster, C. Gebhardt, and B. R. C. Terra, “The future of the university and the university of the future: evolution of ivory tower to entrepreneurial paradigm,” *Res. Policy*, vol. 29, no. 2, pp. 313–330, Feb. 2000.
- [3] A. Lockett, M. Wright, and A. Wild, “The Institutionalization of Third Stream Activities in UK Higher Education: The Role of Discourse and Metrics,” *Br. J. Manag.*, vol. 26, no. 1, pp. 78–92, Jan. 2015.
- [4] R. Pinheiro, P. V. Langa, and A. Pausits, “The institutionalization of universities’ third mission: introduction to the special issue,” *Eur. J. High. Educ.*, vol. 5, no. 3, pp. 227–232, Jul. 2015.
- [5] C. Gunasekara, “Reframing the Role of Universities in the Development of Regional Innovation Systems,” *J. Technol. Transf.*, vol. 31, no. 1, pp. 101–113, Jan. 2006.
- [6] H. Etzkowitz and L. Leydesdorff, “The dynamics of innovation: from National Systems and ‘Mode 2’ to a Triple Helix of university–industry–government relations,” *Res. Policy*, vol. 29, no. 2, pp. 109–123, Feb. 2000.
- [7] M. Shattock, Unesco, and International Institute for Educational Planning, *Entrepreneurialism in universities and the knowledge economy: diversification and organizational change in European higher education*. Society for Research into Higher Education & Open University Press, 2009.
- [8] H. Etzkowitz, “Innovation in Innovation: The Triple Helix of University-Industry-Government Relations,” *Soc. Sci. Inf.*, vol. 42, no. 3, pp. 293–337, Sep. 2003.
- [9] N. Budyldina, “Entrepreneurial universities and regional contribution,” *Int. Entrep. Manag. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 265–277, Jun. 2018.
- [10] J. Berbegal-Mirabent and A. D. Guerrero, “Examining technology transfer activities at universities: Does one recipe explain all outcomes?” pp. 137–144, 2016.
- [11] B. Bozeman, “Technology transfer and public policy: A review of research and theory,” *Res. Policy*, 29, 4, 627–655, 2000.
- [12] A. Sengupta and A. S. Ray, “University research and knowledge transfer: A dynamic view of ambidexterity in british universities,” *Res. Policy*, vol. 46, no. 5, pp. 881–897, Jun. 2017.
- [13] D. Tranfield, D. Denyer, and P. Smart, “Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review,” *Br. J. Manag.*, vol. 14, no. 3, pp. 207–222, Sep. 2003.
- [14] A. Bolderston, “Writing an Effective Literature Review,” *J. Med. Imaging Radiat. Sci.*, vol. 39, no. 2, pp. 86–92, Jun. 2008.
- [15] D. J. Cook, C. D. Mulrow, and R. B. Haynes, “Systematic review series Systematic Reviews: Synthesis of Best Evidence for Clinical Decisions,” 1997.
- [16] J. Jesson and F. Lacey, *Pharmacy education*, vol. 6, no. 2. Gordon and Breach Pub. Group, 2000.
- [17] L. Pittaway, M. Robertson, K. Munir, D. Denyer, and A. Neely, “Networking and innovation: a systematic review of the evidence,” *Int. J. Manag. Rev.*, vol. 5–6, no. 3–4, pp. 137–168, Sep. 2004.
- [18] S. Gupta et al., “Systematic Review of the Literature: Best Practices,” *Acad. Radiol.*, Jul. 2018.
- [19] C. Grimpe and K. Hussinger, “Formal and Informal Knowledge and Technology Transfer from Academia to Industry: Complementarity Effects and Innovation Performance,” *Ind. Innov.*, vol. 20, no. 8, pp. 683–700, Nov. 2013.
- [20] T. K. Sung and D. V. Gibson, “Knowledge and Technology Transfer: Levels and Key Factors,” 2000.
- [21] J. Berbegal-Mirabent, F. Sabaté, and A. Cañabate, “Brokering knowledge from universities to the marketplace,” *Manag. Decis.*, vol. 50, no. 7, pp. 1285–1307, Jul. 2012.
- [22] D. Sahal, “The transfer and utilization of technical knowledge,” 1982.
- [23] R. Landry, N. Amara, and M. Ouimet, “Determinants of knowledge transfer: evidence from Canadian university researchers in natural sciences and engineering,” *J. Technol. Transf.*, vol. 32, no. 6, pp. 561–592, Sep. 2007.

- [24] C. M. Serbanica, D. L. Constantin, and G. Dragan, "University-Industry Knowledge Transfer and Network Patterns in Romania: Does Knowledge Supply Fit SMEs' Regional Profiles?" *Eur. Plan. Stud.*, vol. 23, no. 2, pp. 292-310, Feb. 2015.
- [25] A. Wersun, "Triple translation: academic and managerial discourses of knowledge transfer policy in a new university in Scotland," *Discourse Stud. Cult. Polit. Educ.*, vol. 31, no. 5, pp. 665-682, Dec. 2010.
- [26] OECD, Commercialising Public Research. OECD Publishing, 2013.
- [27] D. S. Siegel, D. A. Waldman, L. E. Atwater, and A. N. Link, "Toward a model of the effective transfer of scientific knowledge from academicians to practitioners: qualitative evidence from the commercialization of university technologies," *J. Eng. Technol. Manag.*, vol. 21, no. 1-2, pp. 115-142, Mar. 2004.
- [28] J. Friedman and J. Silberman, "University Technology Transfer: Do Incentives, Management, and Location Matter?" *J. Technol. Transf.*, vol. 28, no. 1, pp. 17-30, 2003.
- [29] J. B. Powers, "Commercializing Academic Research: Resource Effects on Performance of University Technology Transfer," *J. Higher Educ.*, vol. 74, no. 1, pp. 26-50, 2003.
- [30] D. S. Siegel, R. Veugelers, and M. Wright, "Technology transfer offices and commercialization of university intellectual property: performance and policy implications," *Oxford Rev. Econ. Policy*, vol. 23, no. 4, pp. 640-660, Dec. 2007.
- [31] M. Perkmann et al., "Academic engagement and commercialisation: A review of the literature on university-industry relations," *Res. Policy*, vol. 42, no. 2, pp. 423-442, Mar. 2013.
- [32] C. Liyanage, T. Elhag, T. Ballal, and Q. Li, "Knowledge communication and translation - a knowledge transfer model," *J. Knowl. Manag.*, vol. 13, no. 3, pp. 118-131, May 2009.
- [33] E. Sá, D. Dias, and M. J. Sá, "Towards the university entrepreneurial mission: Portuguese academics' self-perspective of their role in knowledge transfer," *J. Furth. High. Educ.*, vol. 42, no. 6, pp. 784-796, Aug. 2018.
- [34] D. Baglieri, F. Baldi, and C. L. Tucci, "University technology transfer office business models: One size does not fit all," *Technovation*, vol. 76-77, pp. 51-63, Aug. 2018.
- [35] K. De Moortel and T. Crispeels, "International university-university technology transfer: Strategic management framework," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 135, pp. 145-155, Oct. 2018.
- [36] H. Alavi; and P. Habek, "Optimizing outcome in the university - industry technology transfer projects," *Management Syst. Prod. Eng.*, 2016.
- [37] D. J. Jefferson, M. Maida, A. Farkas, M. Alandete-Saez, and A. B. Bennett, "Technology transfer in the Americas: common and divergent practices among major research universities and public sector institutions," *J. Technol. Transf.*, vol. 42, no. 6, pp. 1307-1333, Dec. 2017.
- [38] X. Yu and J. Yan, "Research on University Knowledge Transfer Strategy Selection based on Innovation Intermediary," *Educ. Sci. Theory Pract.*, vol. 18, no. 5, Oct. 2018.
- [39] K. Hoye and F. Pries, "'Repeat commercializers,' the 'habitual entrepreneurs' of university-industry technology transfers". *Technovation*, vol. 29, no. 10, pp. 682-689, Oct. 2009.
- [40] S. Kergroach, D. Meissner, and N. S. Vonortas, "Technology transfer and commercialisation by universities and PRIs: benchmarking OECD country policy approaches," *Econ. Innov. New Technol.*, vol. 27, no. 5-6, pp. 510-530, Aug. 2018.
- [41] A. Hyytinen and P. Ilmakunnas, "What distinguishes a serial entrepreneur?" *Ind. Corp. Chang.*, vol. 16, no. 5, pp. 793-821, May 2007.
- [42] M. Klofsten and D. Jones-Evans, "Comparing Academic Entrepreneurship in Europe - The Case of Sweden and Ireland," *Small Bus. Econ.*, vol. 14, no. 4, pp. 299-309, 2000.
- [43] L. M. Puerta Sierra and S. J. Jasso Villazul, "University-industry linkage and technology transfer management," *J. Manag. Dev.*, vol. 37, no. 7, pp. 573-585, Aug. 2018.
- [44] D. S. Siegel and M. Wright, "Academic Entrepreneurship: Time for a Rethink?" *Br. J. Manag.*, vol. 26, no. 4, pp. 582-595, 2015.
- [45] M. Wynn and P. Jones, "Knowledge Transfer Partnerships and the entrepreneurial university," *Ind. High. Educ.*, vol. 31, no. 4, pp. 267-278, Aug. 2017.
- [46] E. C. for E. and C. Development, "A Guiding Framework for Entrepreneurial Universities Final version 18 th," 2012.
- [47] L. Leydesdorff and H. Etzkowitz, "Emergence of a Triple Helix of university-industry-government relations," *Sci. Public Policy*, vol. 23, no. 5, pp. 279-286, Oct. 1996.
- [48] P. H. M. Desidério and M. A. Zilber, "A inovação aberta na perspectiva da hélice tríplice: observações da relação universidade-empresa na transferencia tecnológica". *Rev. Gestão, Inovação e Tecnol.*, vol. 6, no. 2, pp. 3209-3225, Jun. 2016.
- [49] F. L. P. Toscano, E. W. Mainardes, and S. V. Lasso, "Exploring Challenges in University Technology Transfer in Brazil". *Int. J. Innov. Technol. Manag.*, vol. 14, no. 04, p. 1750021, Aug. 2017.
- [50] D. S. Siegel, D. Waldman, and A. Link, "Assessing the impact of organizational practices on the relative productivity of university technology transfer offices: an exploratory study," *Res. Policy*, vol. 32, no. 1, pp. 27-48, Jan. 2003.
- [51] J. M. Azagra-Caro, D. Barberá-Tomás, M. Edwards-Schachter, and E. M. Tur, "Dynamic interactions between university-industry knowledge transfer channels: A case study of the most highly cited academic patent," *Res. Policy*, vol. 46, no. 2, pp. 463-474, Mar. 2017.
- [52] M. Hamdoun, C. J. Chiappetta Jabbour, and H. Ben Othman, "Knowledge transfer and organizational innovation: Impacts of quality and environmental management," *J. Clean. Prod.*, vol. 193, pp. 759-770, Aug. 2018.
- [53] M. Carree, R. Piergiovanni, E. Santarelli, and I. Verheul, "Factors favoring innovation from a regional perspective: A comparison of patents and trademarks," *Int. Entrep. Manag. J.*, vol. 11, no. 4, pp. 793-810, Dec. 2015.
- [54] F. Rossi, "The drivers of efficient knowledge transfer performance: evidence from British universities," *Cambridge J. Econ.*, vol. 42, no. 3, pp. 729-755, Apr. 2018.
- [55] E. M. de la Torre, T. Agasisti, and C. Perez-Esparrells, "The relevance of knowledge transfer for universities' efficiency scores: an empirical approximation on the Spanish public higher education system," *Res. Eval.*, vol. 26, no. 3, pp. 211-229, Jul. 2017.
- [56] Cornell University, INSEAD, The Global Innovation Index 2017 Innovation Feeding the World. 2017.
- [57] D. S. Siegel, D. A. Waldman, L. E. Atwater, and A. N. Link, "Toward a model of the effective transfer of scientific knowledge from academicians to practitioners: qualitative evidence from the commercialization of university technologies," *J. Eng. Technol. Manag.*, vol. 21, no. 1-2, pp. 115-142, Mar. 2004.
- [58] H. S. Fuquen and E. S. Olaya-Escobar, "A technology transfer strategy based on the dynamics of the generation of intellectual property in Latin-America," *Intang. Cap.*, vol. 14, no. 2, pp. 203-252, 2018.

- [59] J. Frishammar, A. Richtner, A. Brattström, M. Magnusson, and J. Björk, "Opportunities and challenges in the new innovation landscape: Implications for innovation auditing and innovation management," *Eur. Manag. J.*, May 2018.
- [60] CEPAL, "Ciencia, tecnología e innovación en la economía digital. La situación de América Latina y el Caribe," Segunda Reun. la Conf. Ciencia, Innovación y TIC la CEPAL, p. 96, 2016.
- [61] CRES, Tendencias de la educación superior en América Latina y el Caribe 2018.
- [62] Y.-C. Shen, "Identifying the key barriers and their interrelationships impeding the university technology transfer in Taiwan: a multi-stakeholder perspective," *Qual. Quant.*, vol. 51, no. 6, pp. 2865–2884, Nov. 2017.
- [63] S. R. Bradley, C. S. Hayter, and A. N. Link, "Models and Methods of University Technology Transfer," *Found. Trends® Entrep.*, vol. 9, no. 6, pp. 571–650, 2013.

Análisis de tendencias investigativas asociadas a la Industria 4.0

Mary A. Mendoza P.¹

Lizeth F. Serrano C.²

Ivanhoe Rozo R.³

Universidad Católica de Colombia – Colombia

La Industria 4.0 está comprendida por las tecnologías que incluyen los sistemas cibernéticos, el Internet de las cosas y el Internet de los servicios. Estas tecnologías permiten la comunicación interactiva y el intercambio de información a través de Internet no sólo entre humanos, entre humanos y máquinas; sino también se desarrolla en un nuevo paradigma donde las propias máquinas interactúan entre sí. Al considerar la relevancia de abordar esta temática desde una perspectiva estratégica, este capítulo tiene como propósito profundizar en el concepto y realizar un análisis de las tendencias investigativas que están relacionadas con el mismo. Con este propósito, se realizó una revisión sistemática de literatura complementada con un ejercicio de vigilancia tecnológica utilizando como apoyo el software de minería de datos VantagePoint®. Los resultados evidencian el creciente interés para la comunidad académica, industrial y de negocios en la temática. Igualmente, se identificó la necesidad de generar acciones de política pública orientadas a la apropiación de la tecnología y al manejo del cambio y así aportar al desarrollo competitivo de los países y a la reducción de las brechas sociales que la Industria 4.0 podría generar por su impacto en el empleo. Finalmente, se encontró que la principal tendencia en las investigaciones desarrolladas sobre el tema está relacionada con la profundización en las características propias de la sociedad del conocimiento y con el estudio de mecanismos para el desarrollo de competencias blandas en los individuos que permitan agilizar los procesos de adopción del cambio en dinámicas de innovación aceleradas.

1. INTRODUCCIÓN

La Industria 4.0 se entiende como una tendencia global que se encuentra asociada a la necesidad de la personalización de los productos manufactura en el contexto global [1]. En esta industria, entendida por algunos autores como cuarta revolución industrial, se abordan tecnologías que permiten una adecuada recopilación de datos, procesos de manufactura inteligente y toma de decisiones en tiempo real [2] para optimizar los procesos de producción. Uno de los aportes destacados de la Industria 4.0, es la necesidad de una adaptación al cambio digital y la profundización en la investigación de los fenómenos para mejorar los métodos de crecimiento productivo [3]. En esta dinámica, también se muestran como relevantes los desarrollos tecnológicos asociados a la comunicación inteligente, donde se encuentra como eje central de la Industria 4.0 la integración de información de diferentes fuentes para toma decisiones y la generación de modelos de negocio eficientes [4].

La Industria 4.0 es una tendencia que genera impactos directos en el futuro de los sistemas productivos en países industrializados [5], generando a su vez implicaciones sociales. Esta industria se encuentra representada en diversas tecnologías y marcos de referencia, que han sido desarrollados en las recientes décadas, pero poco investigados a pesar de la creciente popularidad de esta vertiente y las grandes expectativas en cuanto a innovación e impacto. Lo anterior, explica la necesidad de su análisis y la profundización en el entendimiento de su concepto, para facilitar su integración en la dinámica organizativa a la vez que direcciona las futuras líneas de investigación sobre el campo de conocimiento [5].

Bajo estas premisas, el objetivo de esta investigación es la identificación de tendencias asociadas al estudio de la Industria 4.0 desde la perspectiva investigativa, para favorecer y agilizar su entendimiento, tanto desde la perspectiva investigativa como práctica, y así reconocer los beneficios que esta tendencia puede generar en términos de la facilidad en los procesos de articulación entre necesidades del cliente, conexión de la cadena de valor en tiempo real, manufactura inteligente, análisis de datos y desarrollo de procesos fundamentados en lógicas de interconexión entre objetos [5]. Para cumplir el propósito de la investigación, se desarrolló un ejercicio de vigilancia tecnológica y una revisión sistemática de la literatura relevante sobre el tópico. El análisis de investigaciones precedentes permitió la síntesis y generación de nuevo conocimiento que articula los aportes precedentes en la literatura desde una perspectiva sistemática y rigurosa.

2. MÉTODO

La estructura metodológica de la investigación está integrada por dos fases: 1) vigilancia tecnológica para la identificación de tendencias sobre el campo de conocimiento, y 2) revisión sistemática de literatura para profundizar en el entendimiento del tema.

2.1 Vigilancia tecnológica

Desde la perspectiva de algunos autores, la Vigilancia tecnológica es un proceso sistemático donde se identifican las evoluciones y novedades asociadas a la información tecnológica [6], con el propósito de determinar y comunicar

¹ mamendoza@ucatolica.edu.co

² lfserranoc@ucatolica.edu.co

³ irozo@ucatolica.edu.co

oportunidades y amenazas, así como los principales referentes generales a nivel mundial y soportar la toma de decisiones en iniciativas estratégicas que se quieran emprender tanto desde la perspectiva investigativa como práctica. Así, se entiende la Vigilancia Tecnológica implica un proceso organizado de observación y análisis del entorno, que integra el tratamiento, el reporte y la circulación interna de los hechos observados y su posterior utilización para la toma de decisiones [7]. En este caso, el propósito del ejercicio de vigilancia tecnológica se orientó a la identificación de tendencias investigativas sobre el campo de conocimiento. Para la realización del ejercicio de Vigilancia Tecnológica se utilizó como referente la propuesta metodológica establecida por Palop, Martínez, y Bedoya [8], que integra a su vez los planteamientos propuestos por Palop y Vicente [7] en el año 1999. La Figura 1 sintetiza, las tres fases y las siete etapas que se implementaron para consolidar el estudio.

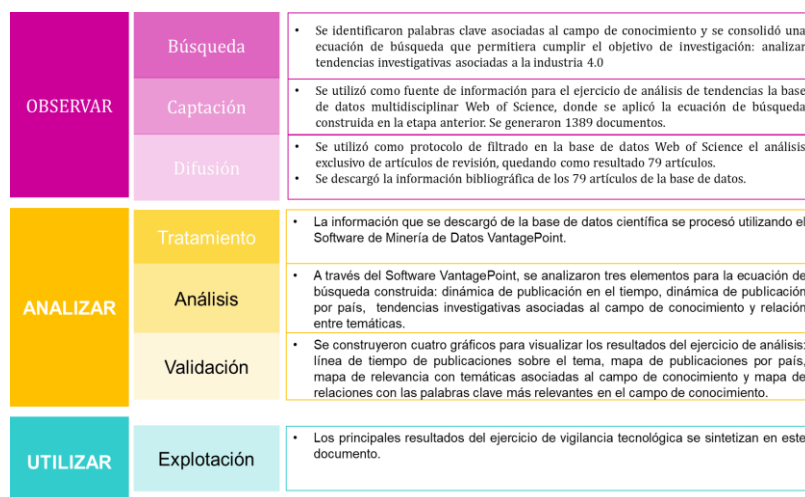


Figura 1. Estructura metodológica desarrollada para la consolidación del ejercicio de Vigilancia Tecnológica que permitiera entender tendencias asociadas a la industria 4.0 considerando como referente la propuesta metodológica [7] y [8]

2.2 Revisión sistemática de literatura

La revisión sistemática, es un estudio integrativo, observacional, retrospectivo, secundario, donde se analiza la literatura para dar respuesta a una pregunta de investigación [6], desde la perspectiva de Jesson [9] la revisión sistemática se entiende como “un método de investigación en sí mismo que deriva sus resultados de los datos ya descritos en la literatura publicada.” Complementario a lo anterior, Sampieri define la revisión como un espacio que integra fuentes y fases, donde se analiza la información siguiendo diferentes fases: planeación, análisis, desarrollo y reporte de resultados [10].

En esta investigación se utilizó como criterio de exclusión en el proceso de filtrado de los datos obtenidos en la base de datos: el análisis de artículos de revisión y el estudio de documentos que se orientaran a la identificación del concepto de industria 4.0 o al análisis de tendencias asociadas a este concepto. El proceso de filtrado se muestra en la Figura 2. Considerando como referente a Kitchenham [11], la metodología de revisión sistemática siguió tres fases que se describen a continuación.

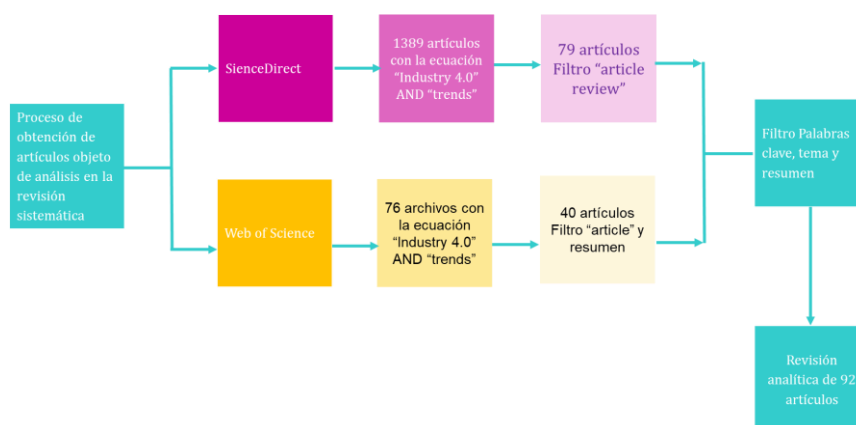


Figura 2. Proceso de obtención de artículos objeto de análisis en el desarrollo de la revisión sistemática de literatura

- **Planeación:** En esta etapa se estableció un protocolo de búsqueda para realizar la revisión de literatura. Se definieron como palabras claves, Industria 4.0, cuarta revolución, gestión del cambio, desarrollo agile y tendencias de la cuarta revolución. De acuerdo con las palabras claves, se construyó la ecuación de búsqueda (“Industry 4.0” AND “trends”) y se aplicó en dos bases de datos: ScienceDirect y WOS (Web of Science).

- *Desarrollo de la revisión:* En esta etapa se establecieron los criterios de revisión, para sustentar teóricamente el estudio [10], y poder desarrollar un ejercicio de revisión integrando una perspectiva analítica. En este caso, se estableció que los artículos analizados deberían contener información explícita sobre Industria 4.0 y campos de desarrollo de la misma. Para evidenciar este criterio de inclusión en los documentos, se analizaron de forma secuencial los apartados título, resumen y palabras clave.
- *Publicación de resultados:* Los 92 artículos resultantes del proceso de análisis, fueron procesados utilizando el software de análisis cualitativo MAXQDA, se construyeron dos categorías analíticas que permitieron organizar los resultados que se sintetizan en este documento: concepto y tendencias asociadas al campo de conocimiento.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de tendencias sobre el campo de conocimiento

3.1.1 Dinámica de publicación en el tiempo

La Figura 3 evidencia que la Industria 4.0 es un tema de interés emergente y que su mayor auge se ha generado desde el 2016, a pesar de que, desde la perspectiva de algunos autores, el concepto fue socializado en Alemania desde el 2011 [12]. Al analizar la línea de tiempo se encuentra que el mayor número de publicaciones se desarrollaron en el año 2018, que puede explicarse dada la rigurosidad con la que el Foro Económico Mundial ha evidenciado la necesidad de crear políticas que le den valor a la sociedad, a través del uso de tecnologías asociadas a la Industria 4.0, que permiten la optimización de procesos y la comunicación en tiempo real de las cadenas de valor en diversos tipos de industrias [13].

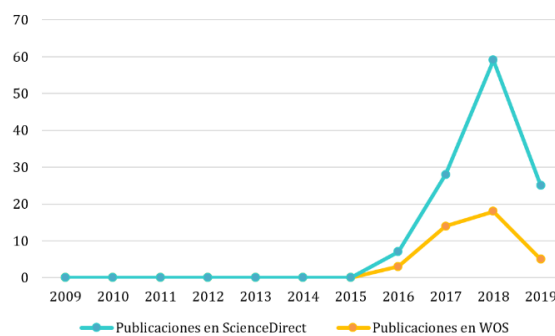


Figura 3. Dinámica de publicación en el tiempo

3.1.2 Dinámica de publicación por país

La revisión sistemática de artículos realizada en la base de datos Web of Science (WOS) evidencia que, en el contexto global, existe una tendencia creciente en el desarrollo de publicaciones sobre el tema. Se destaca la generación de una mayor investigación sobre el tema en Europa occidental, Alemania e Italia (Figura 4). Lo anterior, se explica en que en estos países se encuentran los precursores del término “Industria 4.0”. Finalmente, se evidencia que, en América, Estados Unidos lidera el análisis en el campo de conocimiento y que Colombia está en proceso de inicio en la investigación sobre el tema.

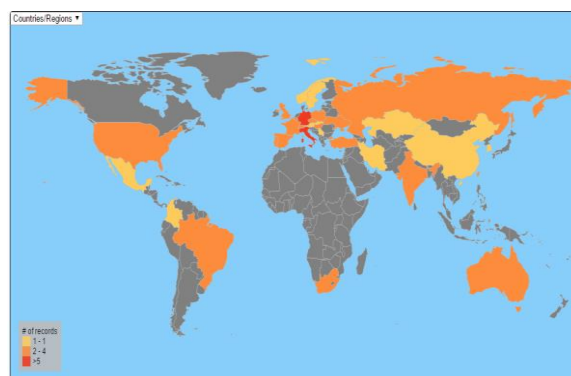


Figura 4. Dinámica de Publicación por país en el campo de conocimiento

3.1.3 Tendencias asociadas al campo de conocimiento

A partir del análisis de las palabras clave propuestas por los autores de los artículos seleccionados para este estudio, se construyeron la Figura 5 y la Figura 6, para las bases de datos Web of Science y ScienceDirect respectivamente.

Para la construcción de los mapas, se utilizó como apoyo el software VantagePoint®, que permitió seleccionar las palabras clave con mayor relevancia para el tema de estudio, filtrando aquellas que aparecieran en más de tres artículos. En los mapas, el tamaño de la palabra es directamente proporcional a la cantidad de artículos que la mencionan. Al analizar los mapas generados, se evidenciaron dos tendencias emergentes: la primera, evidencia aspectos asociadas a la investigación del tema; y la segunda evidencia elementos asociados a la utilización de Industria 4.0 en las organizaciones. Desde la perspectiva investigativa se destaca la profundización en temáticas como IOT (49 artículos), Big Data (31 Artículos), Cyber Physical Systems, Inteligencia artificial (30 artículos), Cloud Computing (6 Artículos) y Manufactura inteligente (17 Artículos). Desde la perspectiva práctica, se encuentran tópicos asociados a: Seguridad de información (12 Artículos), e-health (14 artículos), gestión del cambio (18 Artículos) y Bioeconomía (14 artículos).



Figura 5. Mapa de relevancia con las principales tendencias asociadas al campo de conocimiento de WoS



Figura 6. Mapa de relevancia con las principales tendencias asociadas al campo de conocimiento de ScienceDirect

Complementario a lo anterior, se consolidaron la Figura 7 y la Figura 8 para cada una de las bases de datos utilizadas en el estudio. Estas figuras presentan las relaciones entre palabras clave utilizadas por los autores en sus investigaciones. Se evidencia que el estudio de la Industria 4.0 se ha desarrollado desde una perspectiva multidisciplinar, que articula múltiples tópicos a nivel mundial. Dado lo anterior, a continuación, se presenta en síntesis el análisis de cada una de las tendencias identificadas. Para el análisis de tendencias, se dividieron en dos categorías principales, la primera categoría son las tendencias originales del estudio de tecnología y cuarta revolución industrial y la segunda, las tendencias de estudio que surgieron como efecto de utilizar la cuarta revolución industrial e incluyen la apropiación de la Industria 4.0 y los requerimientos de la sociedad.

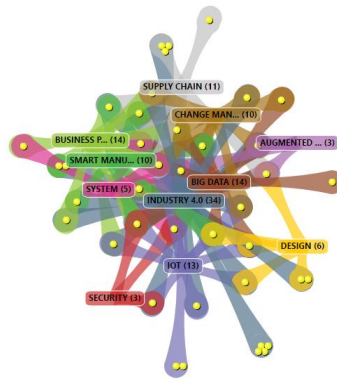


Figura 7. Relación entre tópicos asociados al campo de conocimiento de WoS

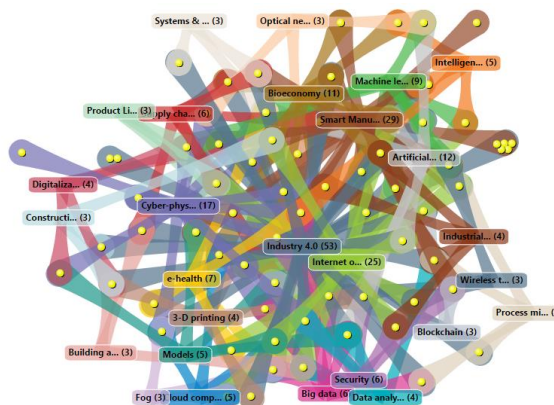


Figura 8. Relación entre tópicos asociados al campo de conocimiento de ScienceDirect

- *Industria 4.0.* La cuarta revolución industrial es una tendencia emergente que necesita implementarse para poder aportar a la satisfacción de las necesidades de los clientes en tiempo real [11]. Se evidencia que el término Industria 4.0 es la palabra clave más utilizada por investigadores, creadores de políticas y emprendedores, cuando describen como a nivel mundial los sistemas industriales podrán generar valor para la sociedad a través de las nuevas tecnologías [12]. La cuarta revolución industrial está transformando los sistemas económicos y a su vez, tiende a promover la integración entre el concepto de información y manufactura. Esto lleva a un nuevo concepto disruptivo de control de la industria a nivel mundial en donde busca extender su experticia en toda la cadena de valor [16]. Al analizar las diferentes tendencias de investigación relacionadas con la cuarta revolución, se tiene como eje principal la necesidad de tomar de decisiones basadas en la analítica de datos [17]. La industria 4.0 es una estrategia de alta tecnología que es la máxima representación de la cuarta revolución, describe el incremento de la digitalización y comunicación entre la creación de los productos, su entorno de negocio y el crecimiento del sector [18]. Todo lo anterior se traduce en dinámicas que agreguen tanto valor a los productos como mejoras en las conexiones con los clientes [19]. En síntesis, la Industria 4.0 promueve la integración entre información y manufactura [16]; ejemplo de ello son las múltiples conexiones generadas entre procesos tecnológicos y físicos para dar respuesta a necesidades de contextos específicos [20].
- *Internet de las Cosas (IOT).* La primera vez que se usó la palabra IOT fue en 1999, en donde se explicaba que las cosas tenían la capacidad de realizar trabajos de forma más acertada y colaborativa [21]. Hoy, el Internet de las cosas ha generado un escenario de usos con un alto espectro a nivel mundial, en donde los objetos pueden interactuar entre ellos mismos para satisfacer necesidades de los clientes [22]. Se espera que el número de objetos conectados llegue a alcanzar en 2020 más de 30 billones entre teléfonos inteligentes, ciudades, casas, salud entre otros [23]. El incremento acelerado de los objetos de uso diario para información en tiempo real, será la base de creación de futuras aplicaciones y de nuevas tecnologías que busquen satisfacer las necesidades del cliente y se espera que esta tendencia siga en crecimiento [24]. Esta visión de interconexión de los objetos, busca una estrategia de transformación en las industrias de manufactura, para la generación de conexiones entre máquinas y el desarrollo de procesos de sincronía entre oferta y demanda en tiempo real [25]. Se tiene previsto que la carga de tráfico inalámbrico tenga un crecimiento anual del 60% [26]. De acuerdo con la tendencia, la próxima generación de industrias inteligentes, deben tener como base sensores que permitan la conexión inteligente de objetos [27]. Como tecnología emergente, se espera que el Internet de las cosas logre mejorar los tiempos de operación y mejore la eficiencia en los procesos de manufactura, lo que sería directamente proporcional a la generación de reducción de costos en las industrias [28]. Este tipo de tecnología, implica estandarizar las iniciativas de acuerdo a los diferentes segmentos del mercado para mejorar las características específicas que demanden los clientes en los diversos contextos industriales [29].
- *Big Data.* Así como el Internet de las cosas, permite conectar en red los diferentes objetos, esta interconexión genera información que requiere análisis adecuados para la toma de decisiones acertadas [30]. La conexión real, puede ocasionar dispersión en los procesos de toma de decisiones en las industrias inteligentes; y esto genera obstáculos en el control de la cadena de valor del producto [31]. La tendencia del Big data se enfoca en la capacidad de analizar grandes cantidades de datos resultado de la conexión y articulación de los sistemas. Lo anterior permite evidenciar una oportunidad de crecimiento industrial, al administrar la información de forma eficiente [32]. Como complemento al análisis de grandes cantidades de datos, se suma a la tendencia de la integración del Big Data en la dinámica industrial, el desarrollo de iniciativas que integren la minería de datos, con el fin de establecer metodologías adecuadas para determinar las diferentes posibilidades de toma de decisiones sobre la información en las organizaciones [33].
- *Realidad Aumentada.* La realidad aumentada es el término general utilizado para las tecnologías basadas en representaciones geométricas para la visualización más real de la información [34]. Puede utilizar extensión digital, 3D y modelación de datos [34]. Se prevé que, en un futuro cercano, los objetos virtuales podrían conectarse a través del internet de las cosas para poder recopilar datos y simular procesos de producción [28]. En este contexto, la innovación y la investigación, son determinantes en la cuarta revolución, entendiendo que, al integrar estas capacidades con tecnologías como la realidad aumentada, se pueden desarrollar iniciativas de modelación y procesos de prototipado a bajo costo [35]. Un ejemplo de lo anterior, es la industria textil, en donde se han venido desarrollando habilidades para crear formas y técnicas que permiten analizar el estiramiento y forma de las telas, desde impresiones 3D [36] y simulación virtual. La impresión 3D no es un proceso aislado, es el resultado de la solución de la necesidad de la interacción entre procesos digitales y físicos donde intervienen procesos de modelación y de diseño de datos [37]. Finalmente, se encuentra que la impresión 3D, como eje tópico en la cuarta revolución industrial, está articulado a la impresión de objetos desde su programación en software de diseño, para facilitar su estudio y utilización en procesos industriales más complejos [38].
- *Inteligencia Artificial.* La necesidad de creación de sistemas autónomos para evitar el error humano, lleva al creciente interés investigativo asociado a la inteligencia artificial, que se fundamenta en tecnologías a las que se les adiciona capacidad de razonamiento, manejo de datos y toma de decisiones [39]. Esta tendencia le permitirá a la industria optimizar recursos y tiempo para mejorar su funcionamiento.

- *Cyberphysical Systems.* Cyberphysical Systems es la base de la industria inteligente, objetos usables, ciudades inteligentes, medicina inteligente, entre otros [40]. En este tipo de sistemas, los objetos son controlados por algoritmos y recientes avances tecnológicos, han permitido el trabajo en red y el desarrollo de procesos de aprendizaje entre los mismos sistemas computacionales [41]. Como tecnología emergente, se espera de los sistemas físicos, soluciones para transformar la operación industrial [42]. En el mercado global, la infraestructura de manufactura, está al frente de una competencia constante. Con el fin de mantener la participación en el mercado, se debe innovar en procesos de administración de los recursos para satisfacer las necesidades del cliente [43]. Como resultado de la digitalización, estas transformaciones se pueden organizar en datos recopilados en tiempo real y a través de la creación de algoritmos que permitan analizar de forma autónoma las falencias existentes en la operación de las industrias [44]. Los equipos interconectados, permiten crear entornos de manufactura inteligente. Los investigadores han proyectado que la tendencia de crecimiento de aprendizaje autónomo en los sistemas físicos, les permitirá también a las empresas volverse más inteligentes para buscar satisfacer las necesidades del cliente y de esta forma cambiar la forma en que se diseñan y desarrollan productos y/ servicios [45].
- *Cloud Computing.* La computación en la nube, está en proceso de revolución de la industria de tecnología. Permite guardar la información en tiempo real para lograr una colaboración e intercambio de datos con mejor eficiencia permitiendo la transformación de la misma por diversos actores de forma simultánea [46]. Tener la información en tiempo real, les permite a las organizaciones monitorear tareas y procesos complejos para poder mejorar rendimientos en su operación [31]. Al mismo tiempo, el Cloud Computing, permite a la cadena de valor, escalar la información para diversificar la toma de decisiones integrando información en tiempo real, haciéndola visible y accesible para los diversos actores [47].
- *Smart Manufacturing.* La manufactura inteligente, es la integración de la mayoría de las tendencias de la cuarta revolución. En su gran proporción, las compañías están trabajando en encontrar estrategias relevantes para darle valor agregado a sus productos. La creación de estrategias de mejora, que impliquen mejoras de calidad, necesitan análisis rigurosos de información [48]. La complejidad de estos análisis está en constante aumento de la mano con los avances tecnológicos, el incremento de las expectativas del mercado y el aumento de requerimientos legislativos y de calidad de los productos [49]. Así, se requieren avances tecnológicos para optimizar las diferentes técnicas de fabricación [35]. Las empresas de manufactura más tradicionales en el mundo, están diseñadas para la producción en masa con baja flexibilidad. La cuarta revolución, donde se integran procesos de la manufactura inteligente, exige la transformación de los patrones poco flexibles para generar una visión de desarrollo [50], entendiendo además que la información histórica se constituye en elemento vital para potencializar los desarrollos futuros [51]. Otro aspecto relevante en la manufactura inteligente es la integración de manufactura (Integration in Manufacturing -IiM) que busca organizar a las personas y máquinas en un mismo sistema para mejorar los niveles de producción [52].

La demanda de productos de alta calidad a bajo costo, eleva la necesidad de monitoreo constante del proceso, esto implica articular las actividades hacia un mismo fin [53]. Esta integración inteligente de los procesos de manufactura, genera automatización de la industria, que, en un futuro cercano puede traducirse en la generación de robots de bajo costo, con capacidad de analizar información, tomar decisiones y realizar evaluaciones históricas de datos [54]. Esto conlleva a la necesidad de que las organizaciones realicen inversiones estratégicas en tecnología de acuerdo con el comportamiento del consumidor y de acuerdo con el ciclo de vida de los productos y/o servicios generados [55]. La dinámica de transformación de los contextos de manufactura se orienta al monitoreo constante, al análisis del rendimiento de la maquinaria [56] y del equipo y en particular, a la toma de decisiones en tiempo real [57].

3.1.4 Tendencias consecuencia de la Industria 4.0

- *Seguridad.* La seguridad de la información no es una tendencia de la cuarta revolución industrial, pero si es un resultado de las preocupaciones sobre el manejo de la misma, al aplicar los procesos de integración y recolección de datos [58]. Tras analizar la importancia del manejo de datos, existen controversias acerca del impacto social que esta genera y sobre los retos de la gestión y de la distribución masificada de la información [40]. Para algunos autores, la proliferación de internet y la creación de usuarios y contraseñas, se constituye en un reto complejo en términos de seguridad [47]. Igualmente se encuentra que la globalización de la cadena de valor y los cambios demográficos incrementan la variabilidad en las estrategias de protección de datos [59], en especial para el desarrollo de modelos de negocio que permitan articular la conectividad con seguridad [60].
- *e-health.* Un aporte importante de Industria 4.0, es la revolución de la industria de salud a diferentes escalas [61]. Desde la industria de alimentos hasta las de procesos y servicios, la salud juega un rol importante a nivel mundial [62]. La comunicación en tiempo real, el Big Data, la inteligencia artificial, el IoT, entre otras tendencias principales de la cuarta revolución, influyen en la salud mental y física de la sociedad [63]. En salud, la combinación de realidad aumentada y 3D, permiten analizar soluciones en tiempo real [4], en nutrición, el mejoramiento del consumo de

comida procesada y el cambio a comida sostenible gracias a la manufactura inteligente es una concepción que tiende al crecimiento [64]. El cuidado de la salud representa uno de los más importantes retos sociales y económicos a nivel mundial [65], sin embargo, se necesitan más mecanismos que permitan una recolección de información más acertada sobre las consecuencias de la integración de tecnologías y de su efecto en la salud de la sociedad, en especial, se requiere abordar la pregunta compleja de ¿cómo se pueden aprovechar estas tecnologías para mejorar la calidad de vida? [66].

- *Empleabilidad.* Uno de los efectos más evidentes de la Industria 4.0 desde la perspectiva social, está enfocado al análisis de los retos de empleabilidad en entornos de transformación tecnológica [67]; haciéndose más difícil entender el rol de los empleados en empresas inteligentes. El análisis de cómo mejorar las condiciones de trabajo de la fuerza laboral actual y sus capacidades para gestionar las dinámicas de cambio son determinantes para enfrentar las transformaciones aceleradas que las tecnologías generan en la sociedad [68]. A nivel laboral, se espera que con la llegada de la Industria 4.0 se afecte la oferta de empleos relacionados con la manufactura [69]. El trabajo en tiempo real, el trabajo colaborativo y en red, les permitirá a las organizaciones solucionar tareas desde cualquier momento y lugar, esto rompe barreras de tiempo y espacio, liberando cargos no necesarios en las compañías [70]. Así, los nuevos empleos van a requerir nuevas competencias y habilidades, los nuevos cambios de interconectividad y comunicación, requerirán de la mezcla de habilidades tradicionales y nuevas para poder estar a la vanguardia del constante y complejo incremento de las tendencias de la cuarta revolución [71]. Es importante la inversión en nuevos proyectos de tecnología que involucren a personas, fomentar la inversión privada y evaluar el manejo cultural del cambio para la sociedad [72]. Enfocarse en competencias y habilidades en vez de la cualificación, es una sugerencia de algunos autores [73]. Esto implica tanto el desarrollo de conocimientos técnicos, como el desarrollo de competencias blandas para fomentar la actualización constante y la adaptación [15]. En esta dinámica, se encuentra como reto para los sistemas educativos, identificar y cualificar a las nuevas generaciones en cómo adaptarse y anticiparse al cambio [74].
- *Bioeconomy.* Esta tendencia genera como consecuencia del uso de la tecnología, para hacer más eficiente la utilización sostenible de los recursos [75]. En esta tendencia, se utilizan todas las bases de estudio de la cuarta revolución, para que la industria trabaje con enfoques de innovación y avance tecnológico sin acabar los recursos existentes [76]. La medición de excesos y el constante monitoreo en tiempo real, se debe utilizar para gestionar los recursos básicos y desarrollar procesos de reutilización de los existentes [77]. La sustentabilidad en la cuarta revolución, debe dar respuesta a los problemas de eficiencia de energía [78], para lograr satisfacer la demanda energética a nivel mundial [79], y evitar la degradación de la energía existente ocasionada por el crecimiento urbano [80]. La cuarta revolución económicamente amigable con el medio ambiente, implica equipos construidos para adaptarse al cambio y que contribuyan a la recuperación del medio ambiente [81]. Se requieren tecnologías enfocadas a la reutilización de energía [82], a la mejorar las prácticas de manufactura [83], al desarrollo de modelos de negocio con un enfoque de reconciliación entre crecimiento económico y cuidado del medio ambiente a largo plazo [84] y finalmente, iniciativas orientadas al tratamiento de aguas y al desarrollo de procesos industriales ecológicos [85].

3.2 Revisión sistemática de literatura sobre el campo de conocimiento

3.2.1 Conceptualización: Industria 4.0

El éxito de las compañías depende de la capacidad de adaptación a las necesidades del mercado, el consumidor y a su vez de la capacidad de adaptación tecnológica al cambio global [86]. Al realizar una mirada retrospectiva en los ámbitos que revolucionan la industria, se evidencian las tres primeras etapas previas a la cuarta revolución. En la primera revolución industrial, se habló de la utilización de vapor, en la segunda la explotación y el descubrimiento de la electricidad y en la tercera revolución la era de la web e internet. Finalmente, la cuarta revolución también conocida como Industria 4.0, busca minimizar la interacción humana en los procesos industriales y volver los procesos más autónomos para evitar errores [87].

Durante los dos últimos siglos, los sistemas productivos y empresariales, y gubernamentales, se han enfrentado al reto de la competitividad, eficiencia la calidad y procesos de globalización. Por esta razón, se deben promover y generar acciones que les permitan permanecer competitivas en los mercados, siendo una de las actividades estratégicas el análisis del entorno, que permite encaminar las estrategias de desarrollo para anticiparse a las dinámicas de mercado. El constante cambio del entorno y de las necesidades de la sociedad, son algunos de los aspectos relevantes que han ocasionado mayores y más complejos requerimientos a los sistemas productivos y empresariales que desean mantenerse competitivos. La cuarta revolución industrial [88], es una tendencia a nivel mundial, que integra nuevos enfoques en los ecosistemas industriales y empresariales que se fundamenten en la innovación tecnológica.

La llamada cuarta revolución industrial, ha sido descrita como un modelo de nuevas formas de producción y transformación de la industria para un futuro sostenible [89]. Esta revolución tecnológica trae consigo diferentes

temas asociados a: Big data, computación en la nube, inteligencia artificial, internet de las cosas, la manufactura inteligente, la inteligencia artificial y el internet de las cosas, entre otros [19]. Algunos autores caracterizan la Industria 4.0 entre una tendencia que surge por el nacimiento emergente de organizaciones inteligentes, la articulación de los sistemas ciber-físicos y el desarrollo de tecnologías para la comunicación en tiempo real. Según el Foro Económico Mundial [90], las organizaciones deben adaptarse al aceleramiento de la cuarta revolución, lo anterior debe darse acompañado de políticas públicas para maximizar los beneficios empresariales a la vez que se genera valor para la sociedad. Schwab, enfatiza en la necesidad de desarrollar un trabajo conjunto entre las personas, organizaciones y gobiernos para poder superar los grandes retos asociados a la automatización, la eficiencia, y la globalización.

Los entornos inteligentes, como lo estipula la cuarta revolución, implican la inclusión de softwares embebidos en los objetos de utilización diaria, con el fin de fomentar el uso de dispositivos inteligentes que sirvan de apoyo a la actividad común del ser humano. Un punto clave en la industria, es el soporte tecnológico necesario para el funcionamiento de estas tecnologías. La interacción y el monitoreo en tiempo real permitirá generar una industria en un contexto envolvente para el crecimiento vertical de la economía y la generación de información que permita la constante actualización de los requerimientos del cliente y de los otros actores de la cadena de valor [91]

Alemania como precursor del término “Industria 4.0” anunciado por primera vez en 2011 en el Hannover Fair, buscaba enfocarse en la integración del Hardware y software para mejorar los procesos de manufactura, esta iniciativa generó gran acogida a nivel mundial [92]. El concepto de cuarta revolución industrial como tendencia emergente, espera que pueda mejorar las prácticas en las diferentes industrias, en términos de productividad, flexibilidad y calidad; lo cual podría tener un impacto significativo en las actividades diarias de la industria y mejorar los niveles de ingresos a nivel mundial [92]. Es de gran importancia preparar la industria para dar respuesta y promover la revolución de la Industria 4.0 con el fin de mejorar las prácticas de producción a nivel mundial y responder a la demanda global con menos control humano.

La Industria 4.0 es actualmente la prioridad principal de múltiples gobiernos, organizaciones, centros de investigación y Universidades alrededor del mundo; la definición de un único proceso para implementarla es complejo, ya que el proceso de transición y adaptación está en camino [93]. Pero la transformación de la manufactura en procesos inteligentes, generará a su vez un amplio rango de tecnologías que fusionan hardware y software clarificando hacia dónde deberá dirigirse la estrategia de la cuarta revolución a nivel país y a nivel empresarial [94]

3.2.2 Prácticas de referencia en la Industria 4.0

La industria a nivel mundial ha mostrado el interés la implementación de nuevas tecnologías en sus diferentes procesos productivos, por esta razón es primordial evidenciar algunas prácticas asociadas a la cuarta revolución. Donde se evidencia que, con los avances en la conectividad tecnológica, la comunicación, el desarrollo de tecnologías emergentes, el internet de las cosas, y la conexión entre objetos inteligentes, la cuarta revolución industrial busca generar un impacto significativo para el desarrollo y generación de sistemas integrados que se sincronicen en el tiempo real, articulados con los objetos físicos y el ciberespacio [58]. Las prácticas analizadas alrededor de la cuarta revolución industrial giran en torno a:

1. Generar un mayor valor para el cliente [95]. El diseño del producto es clave para identificar las etapas del proceso que se pueden mejorar [96]. Crear una cadena de valor efectiva, es prioridad para que las empresas puedan sobrevivir en este entorno cambiante. Identificar y analizar las estacionalidades de la demanda, le permite a la industria enfocar de forma más eficiente, las necesidades del cliente.
2. Manufactura inteligente, también denominada manufactura colaborativa con el motto: diseñe donde quiera y produzca donde quiera. [92]. Implica la adopción de tecnologías para conectar la maquinaria con sistemas de abastecimiento, producción, y el cliente en tiempo real [95], además de simulación de prototipos para evitar desgaste de producción y tiempo.
3. Comunicación de los objetos entre sí y generación de espacios para compartir la información para poder coordinar las decisiones [97]. También se busca generar un estándar de programación de los objetos [98].
4. Seguridad de la información. Entendiendo que no sólo se comparte información, sino que se requiere definir el cómo se van a proteger los datos que se comparten.
5. Empleabilidad, la cuarta revolución no solo afecta los sistemas de manufactura, sino que tiene un impacto significativo en la empleabilidad en el futuro. Todos los cambios del contexto afectan la posición de los futuros cargos y funciones del ser humano como eje fundamental de la sociedad. Esta situación, conlleva el reto del desarrollo de capacidades de adaptación a las nuevas necesidades de la industria [73].
6. Paralelo a la cuarta revolución industrial está el auge de la producción sustentable y se busca también la integración económica y ambiental por medio de procesos de toma de decisiones bioeconomías para disminuir el cambio climático [99]. Los principios de la Industria 4.0 pueden influenciar todo el ciclo de vida del producto: desde el cómo son manufacturados y también desde la percepción de valor que tiene el cliente del mismo [99]. De

acuerdo a esta visión, la próxima generación de industrias inteligentes tiene como obligación la conexión en red y la innovación para la sustentabilidad [27].

7. La forma tradicional de producción en masa está siendo reemplazada por la personalización de productos y esto implica una manufactura flexible y altamente comunicada [100].

Todas estas prácticas antes descritas tienen un común denominador y es la interconexión de los sistemas de negocio, objetos y equipos, en tiempo real para la toma de decisiones [101]. La clave de las futuras cadenas de valor en un contexto 4.0 está en la capacidad de tomar decisiones en tiempo real para reducir tiempos y reducir los obstáculos de comunicación con sus clientes/usuarios [102].

Los resultados del análisis de tendencias y conceptualización de la Industria 4.0, sustentan dos grandes líneas de trabajo a nivel prospectivo: enfoque técnico de innovación alrededor de la cuarta revolución industrial, es decir, investigación en IOT, sistemas físicos, realidad aumentada, Big Data, entre otras tendencias descritas; y las consecuencias resultados de la misma, el efecto que tienen estos nuevos desarrollos en la comunidad en general y sus diferentes stakeholders.

4. CONCLUSIONES

La Industria 4.0 direcciona conexión entre necesidades y productos finales, esta articulación requiere recolección confiable de datos para la toma correcta de decisiones. Para crear fuentes fiables de información, es necesaria la inversión en tecnología adecuada y la capacitación del personal encargado de la misma, reconociendo que, sin una adecuada recopilación de datos, no es posible una manufactura inteligente, ni la toma de decisiones en tiempo real. Es un proceso cultural que lleva inversión en tiempo y en desarrollo de nuevo conocimiento y capacidades en el largo plazo. Las tendencias centrales de estudio de la cuarta revolución industrial, conllevan a nuevos retos de investigación en industrias pequeñas y medianas, que provean oportunidades para la maduración del horizonte industrial de empresas poco automatizadas.

El concepto de Industria 4.0 implica interacciones con múltiples disciplinas y se evidenció que un enfoque de interés en la literatura es la orientación al cuidado sostenible de la sociedad y el medio ambiente. Las tecnologías ambientalmente sostenibles permiten una sustentabilidad de la industria y a nivel de sociedad, la privacidad de la información y el respeto por la seguridad de la misma crean un nuevo paradigma que orienta el futuro de la cuarta revolución. Uno de los aportes importantes de la cuarta revolución, es la necesidad de generar en las personas capacidades de adaptaciones y anticipación al cambio.

La cuarta revolución industrial propone una adopción de la interconectividad de la producción, con el fin de optimizar procesos, recursos y tiempos. Esta línea emergente de interés mundial, ha incrementado en los últimos años debido al incremento en las demandas, necesidades y exigencias del mercado. Para muchas empresas de primer mundo, han sido el foco estratégico de la agenda de investigaciones. La mayor parte de las publicaciones analizadas se encuentran en Estados Unidos y Europa, sin embargo, muchas de las tecnologías creadas en la cuarta revolución, no se han estudiado con suficiente rigurosidad en Latinoamérica. La Industria 4.0 implica inversión e investigación para adaptar cambios sensibles y flexibles a las necesidades del cliente; la reciente desindustrialización de la industria, ha desarrollado un gran potencial de integración, los principios de inteligencia artificial, articulan la interconectividad y llevan a procesos de innovación. Es requisito fundamental para las futuras generaciones de trabajadores, el desarrollar competencias digitales a lo largo de la vida y potencializar habilidades blandas que les permitan prepararse para el cambio industrial. Las capacidades básicas que se deben potenciar son: auto organización, trabajo en equipo, habilidades comunicativas y resolución de problemas, gestión de personas y empatía.

REFERENCIAS

- [1] Y. Lv and D. Lin, "Design an intelligent real-time operation planning system in distributed manufacturing network," *Ind. Manag. Data Syst.*, vol. 117, no. 4, pp. 742–753, 2017.
- [2] A. G. Frank, G. H. S. Mendes, N. F. Ayala, and A. Ghezzi, "Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 141, pp. 341–351, Apr. 2019.
- [3] M. Tynnhammar, O. Kokshagina, and S. Schneider, "Composing the innovation management symphony – A note on the 2017 ISPIM Innovation Conference in Vienna," *Technovation*, vol. 74–75, p. 66, 2018.
- [4] K. Wegener, F. Bleicher, P. Krajnik, H. W. Hoffmeister, and C. Brecher, "Recent developments in grinding machines," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 779–802, 2017.
- [5] U. H. Govindarajan, A. J. C. Trappey, and C. V. Trappey, "Immersive Technology for Human-Centric Cyberphysical Systems in Complex Manufacturing Processes: A Comprehensive Overview of the Global Patent Profile Using Collective Intelligence," *Complexity*, vol. 2018, pp. 1–17, 2018.
- [6] O. F. Castellanos, Análisis de tendencias: 2011.
- [7] F. PALOP and J. M. VICENTE, "Vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva: su potencial para la empresa española," Madrid: *Cotec*, 1999, p. 108.

- [8] F. PALOP, J. F. MARTÍNEZ, and A. BEDOYA, *Guía metodológica de práctica de la vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva. Proyecto Piloto de Transferencia y Desarrollo de Capacidades Regionales en Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva*. Valencia y Medellín, 2012.
- [9] C. Cronin, "Doing your literature review: traditional and systematic techniques," *Res. Educ.*, vol. 24, no. 3, pp. 219–221, 2011.
- [10] S. Hernandez, *Metodología de la investigación*, 6th ed. 2014.
- [11] B. Kitchenham, "Procedures for Performing Systematic Reviews," 2004.
- [12] "Globalization 4.0 Shaping a New Global Architecture in the Age of the Fourth Industrial Revolution," 2019.
- [13] McKinsey & Company, "The Next Economic Growth Engine Scaling Fourth Industrial Revolution Technologies in Production," 2018. [Online]. Available: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Technology_and_Innovation_The_Next_Economic_Growth_Engine.pdf.
- [14] M. Reis and G. Gins, "Industrial Process Monitoring in the Big Data/Industry 4.0 Era: from Detection, to Diagnosis, to Prognosis," *Processes*, vol. 5, no. 4, p. 35, 2017.
- [15] F. Chiarello, L. Trivelli, A. Bonaccorsi, and G. Fantoni, "Extracting and mapping industry 4.0 technologies using wikipedia," *Comput. Ind.*, vol. 100, no. September 2017, pp. 244–257, 2018.
- [16] A. Ciffolilli and A. Muscio, "Industry 4.0: national and regional comparative advantages in key enabling technologies," *Eur. Plan. Stud.*, vol. 26, no. 12, pp. 2323–2343, Dec. 2018.
- [17] H. L. Yang, T. W. Chang, and Y. Choi, "Exploring the research trend of smart factory with topic modeling," *Sustain.*, vol. 10, no. 8, 2018.
- [18] P. Dallasega, E. Rauch, and C. Linder, "Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review," *Computers in Industry*, vol. 99. Elsevier B.V., pp. 205–225, 01-Aug-2018.
- [19] V. Alcácer and V. Cruz-Machado, "Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Elsevier B.V., 2019.
- [20] E. Dirgová, J. Janičková, and J. Klencová, "New Trends in the Labor Market in the Context of Shared Economy," *TEM J.*, vol. 7, no. 4, pp. 791–797, 2018.
- [21] A. J. C. Trappey, C. V. Trappey, U. Hareesh Govindarajan, A. C. Chuang, and J. J. Sun, "A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 33. Elsevier Ltd, pp. 208–229, 01-Aug-2017.
- [22] F. Marino, C. Moiso, and M. Petracca, "Automatic contract negotiation, service discovery and mutual authentication solutions: A survey on the enabling technologies of the forthcoming IoT ecosystems," *Computer Networks*, vol. 148. Elsevier B.V., pp. 176–195, 15-Jan-2019.
- [23] A. Gupta, A. Anpalagan, G. H. S. Carvalho, A. S. Khwaja, L. Guan, and I. Woungang, "Prevailing and emerging cyber threats and security practices in IoT-Enabled smart grids: A survey," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 132. Academic Press, pp. 118–148, 15-Apr-2019.
- [24] H. Haas, C. Chen, and D. O'Brien, "A guide to wireless networking by light," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 55. Elsevier Ltd, pp. 88–111, 01-Sep-2017.
- [25] S. Kharb and A. Singhrova, "A survey on network formation and scheduling algorithms for time slotted channel hopping in industrial networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 126. Academic Press, pp. 59–87, 15-Jan-2019.
- [26] H. Haas, "LiFi is a paradigm-shifting 5G technology," *Reviews in Physics*, vol. 3. Elsevier B.V., pp. 26–31, 01-Nov-2018.
- [27] M. Lucas-Estañ, M. Sepulcre, T. Raptis, A. Passarella, and M. Conti, "Emerging Trends in Hybrid Wireless Communication and Data Management for the Industry 4.0," *Electronics*, vol. 7, no. 12, p. 400, 2018.
- [28] J. I. R. Molano, J. M. C. Lovelle, C. E. Montenegro, J. J. R. Granados, and R. G. Crespo, "Metamodel for integration of Internet of Things, Social Networks, the Cloud and Industry 4.0," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 9, no. 3, pp. 709–723, 2018.
- [29] F. Montori, L. Bedogni, M. Di Felice, and L. Bononi, "Machine-to-machine wireless communication technologies for the Internet of Things: Taxonomy, comparison and open issues," *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 50, pp. 56–81, 2018.
- [30] S. S. Reka and T. Dragicevic, "Future effectual role of energy delivery: A comprehensive review of Internet of Things and smart grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91. Elsevier Ltd, pp. 90–108, 01-Aug-2018.
- [31] R. Rendall, L. H. Chiang, and M. S. Reis, "Data-driven methods for batch data analysis – A critical overview and mapping on the complexity scale," *Computers and Chemical Engineering*. Elsevier Ltd, pp. 1–13, 08-May-2019.
- [32] L. Aristodemou and F. Tietze, "The state-of-the-art on Intellectual Property Analytics (IPA): A literature review on artificial intelligence, machine learning and deep learning methods for analysing intellectual property (IP) data," *World Patent Information*, vol. 55. Elsevier Ltd, pp. 37–51, 01-Dec-2018.
- [33] F. Gampfer, A. Jürgens, M. Müller, and R. Buchkremer, "Past, current and future trends in enterprise architecture—A view beyond the horizon," *Computers in Industry*, vol. 100. Elsevier B.V., pp. 70–84, 01-Sep-2018.
- [34] F. Caviggioli and E. Ughetto, "A bibliometric analysis of the research dealing with the impact of additive manufacturing on industry, business and society," *International Journal of Production Economics*, vol. 208. Elsevier B.V., pp. 254–268, 01-Feb-2019.
- [35] S. H. Ghaffar, J. Corker, and M. Fan, "Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution," *Automation in Construction*, vol. 93. Elsevier B.V., pp. 1–11, 01-Sep-2018.
- [36] X. Chen, L. Chen, C. Zhang, L. Song, and D. Zhang, "Three-dimensional needle-punching for composites - A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 85. Elsevier Ltd, pp. 12–30, 01-Jun-2016.
- [37] M. Yampolskiy et al., "Security of additive manufacturing: Attack taxonomy and survey," *Additive Manufacturing*, vol. 21. Elsevier B.V., pp. 431–457, 01-May-2018.
- [38] R. Jose and S. Ramakrishna, "Materials 4.0: Materials big data enabled materials discovery," *Appl. Mater. Today*, vol. 10, pp. 127–132, 2018.
- [39] J. Mata et al., "Artificial intelligence (AI) methods in optical networks: A comprehensive survey," *Optical Switching and Networking*, vol. 28. Elsevier B.V., pp. 43–57, 01-Apr-2018.
- [40] R. Alguliyev, Y. Imamverdiyev, and L. Sukhostat, "Cyber-physical systems and their security issues," *Computers in Industry*, vol. 100. Elsevier B.V., pp. 212–223, 01-Sep-2018.
- [41] J. Dekhtiar, A. Durupt, M. Bricogne, B. Eynard, H. Rowson, and D. Kiritsis, "Deep learning for big data applications in CAD and PLM – Research review, opportunities and case study," *Computers in Industry*, vol. 100. Elsevier B.V., pp. 227–243, 2018.

- [42] Y. Lu, "Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 6. Elsevier B.V., pp. 1–10, 01-Jun-2017.
- [43] M. Rosienkiewicz, A. Kowalski, J. Helman, and M. Zbieć, "Development of Lean Hybrid Furniture Production Control System based on Glenday Sieve, Artificial Neural Networks and Simulation Modeling," *Drv. Ind.*, vol. 69, no. 2, pp. 163–173, 2018.
- [44] V. P. Vishnevsky and S. I. Kniaziev, "How to Increase the Readiness of Ukraine's Industry to Smart Transformations," *Sci. Innov.*, vol. 14, no. 4, pp. 49–61, 2018.
- [45] L. Da Xu, E. L. Xu, and L. Li, "Industry 4.0: state of the art and future trends," *Int. J. Prod.*, vol. 56, no. 8, pp. 2941–2962, 2018.
- [46] G. Pedone and I. Mezgár, "Model similarity evidence and interoperability affinity in cloud-ready Industry 4.0 technologies," *Computers in Industry*, vol. 100. Elsevier B.V., pp. 278–286, 01-Sep-2018.
- [47] A. H. Mohsin et al., "Blockchain authentication of network applications: Taxonomy, classification, capabilities, open challenges, motivations, recommendations and future directions," *Computer Standards and Interfaces*, vol. 64. Elsevier B.V., pp. 41–60, 01-May-2019.
- [48] M. Madhikermi, S. Kubler, J. Robert, A. Buda, and K. Främling, "Data quality assessment of maintenance reporting procedures," *Expert Systems with Applications*, vol. 63. Elsevier Ltd, pp. 145–164, 30-Nov-2016.
- [49] A. Farooqui, K. Bengtsson, P. Falkman, and M. Fabian, "From factory floor to process models: A data gathering approach to generate, transform, and visualize manufacturing processes," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 24. Elsevier Ltd, pp. 6–16, 01-Jan-2019.
- [50] "Sci-Hub | Task Allocation in Manufacturing: A Review."
- [51] A. Kusiak, "Fundamentals of smart manufacturing: A multi-thread perspective," *Annual Rev. in Control*. Elsevier Ltd, 2019.
- [52] H. Panetto, B. Iung, D. Ivanov, G. Weichhart, and X. Wang, "Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future," *Annual Reviews in Control*. Elsevier Ltd, 2019.
- [53] D. Mishra, R. B. Roy, S. Dutta, S. K. Pal, and D. Chakravarty, "A review on sensor based monitoring and control of friction stir welding process and a roadmap to Industry 4.0," *Jou. of Manufacturing Processes*, vol. 36. Elsevier Ltd, pp. 373–397, 2018.
- [54] J. Davis, "Smart Manufacturing," *Encycl. Sustain. Technol.*, vol. 7543, no. July, pp. 417–427, 2017.
- [55] M. Bortolini, F. G. Galizia, and C. Mora, "Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 49. Elsevier B.V., pp. 93–106, 01-Oct-2018.
- [56] U. Frieß, M. Kolouch, A. Friedrich, and A. Zander, "Fuzzy-clustering of machine states for condition monitoring," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 23, pp. 64–77, 2018.
- [57] I. R. Uhlmann and E. M. Frazzon, "Production rescheduling review: Opportunities for industrial integration and practical applications," *J. Manuf. Syst.*, vol. 49, pp. 186–193, 2018.
- [58] L. E. Redding and B. Tjahjono, "State of the art in Through-life Engineering Services," *Computers in Industry*, vol. 103. Elsevier B.V., pp. 111–131, 01-Dec-2018.
- [59] A. Lugert, A. Batz, and H. Winkler, "Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries," *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 29, no. 5, pp. 886–906, 2018.
- [60] S. Li, L. Da Xu, and S. Zhao, "5G Internet of Things: A survey," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 10, pp. 1–9, 2018.
- [61] J. Strube et al., "Process intensification in biologics manufacturing," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 133. Elsevier B.V., pp. 278–293, 01-Nov-2018.
- [62] T. Savino, S. Testa, and A. Messeni Petruzzelli, "Researcher understanding of food innovations in Nordic and Southern European countries: A systematic literature review," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 77. Elsevier Ltd, pp. 54–63, 2018.
- [63] H. Lingard, "Occupational health and safety in the construction industry," *Construction Management and Economics*, vol. 31, no. 6. pp. 505–514, 2013.
- [64] K. Flynn et al., "An introduction to current food safety needs," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 84. Elsevier Ltd, pp. 1–3, 01-Feb-2019.
- [65] G. Aceto, V. Persico, and A. Pescapé, "The role of Information and Communication Technologies in healthcare: taxonomies, perspectives, and challenges," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 107, pp. 125–154, 2018.
- [66] S. Khan and T. Yairi, "A review on the application of deep learning in system health management," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 107. Academic Press, pp. 241–265, 01-Jul-2018.
- [67] F. Lamnabhi-Lagarrigue et al., "Systems & Control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges," *Annual Reviews in Control*, vol. 43. Elsevier Ltd, pp. 1–64, 2017.
- [68] C. Kerschner, P. Wächter, L. Nierling, and M. H. Ehlers, "Degrowth and Technology: Towards feasible, viable, appropriate and convivial imaginaries," *Journal of Cleaner Production*, vol. 197. Elsevier Ltd, pp. 1619–1636, 01-Oct-2018.
- [69] M. Conti, A. Passarella, and S. K. Das, "The Internet of People (IoP): A new wave in pervasive mobile computing," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 41. Elsevier B.V., pp. 1–27, 01-Oct-2017.
- [70] B. Esmaeilian, B. Wang, K. Lewis, F. Duarte, C. Ratti, and S. Behdad, "The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper," *Waste Management*, vol. 81. Elsevier Ltd, pp. 177–195, 01-Nov-2018.
- [71] S. Kergroach, "Industry 4.0: New Challenges and Opportunities for the Labour Market," *Foresight STI Gov.*, vol. 11, no. 4, pp. 6–8, 2017.
- [72] R. Woodhead, P. Stephenson, and D. Morrey, "Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem," *Autom. Constr.*, vol. 93, no. October 2017, pp. 35–46, 2018.
- [73] Y. Kazancoglu and Y. D. Ozkan-Ozen, "Analyzing Workforce 4.0 in the Fourth Industrial Revolution and proposing a road map from operations management perspective with fuzzy DEMATEL," *J. Enterp. Inf. Manag.*, vol. 31, no. 6, pp. 891–907, 2018.
- [74] T. D. Oesterreich and F. Teuteberg, "Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry," *Computers in Industry*, vol. 83. Elsevier B.V., pp. 121–139, 01-Dec-2016.
- [75] B. J. Zhang, Q. Q. Tang, Y. Zhao, Y. Q. Chen, Q. L. Chen, and C. A. Floudas, "Multi-level energy integration between units, plants and sites for natural gas industrial parks," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88. Elsevier Ltd, pp. 1–15, 2018.
- [76] H. Sellak, B. Ouhbi, B. Frikh, and I. Palomares, "Towards next-generation energy planning decision-making: An expert-based framework for intelligent decision support," *Renew. and Sustain. Energy Reviews*, vol. 80. Elsevier Ltd, pp. 1544–1577, 2017.

- [77] R. G. Gusmão Caiado, W. Leal Filho, O. L. G. Quelhas, D. Luiz de Mattos Nascimento, and L. V. Ávila, "A literature-based review on potentials and constraints in the implementation of the sustainable development goals," *Journal of Cleaner Production*, vol. 198. Elsevier Ltd, pp. 1276–1288, 10-Oct-2018.
- [78] N. Aste, M. Manfren, and G. Marenzi, "Building Automation and Control Systems and performance optimization: A framework for analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75. Elsevier Ltd, pp. 313–330, 2017.
- [79] M. Faheem et al., "Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges," *Comput. Sci. Rev.*, vol. 30, pp. 1–30, Aug. 2018.
- [80] Z. Huang, H. Yu, Z. Peng, and Y. Feng, "Planning community energy system in the industry 4.0 era: Achievements, challenges and a potential solution," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78. Elsevier Ltd, pp. 710–721, 2017.
- [81] G. Wang, Y. Xu, and H. Ren, "Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 29, no. 2. China University of Mining and Technology, pp. 161–169, 01-Mar-2019.
- [82] A. A. Kireyeva, D. S. Mussabalina, and B. S. Tolysbaev, "Assessment and Identification of the Possibility for Creating IT Clusters in Kazakhstan Regions," *Econ. Reg.*, vol. 14, no. 2, pp. 463–473, 2018.
- [83] M. E. Peralta Álvarez, M. Marcos Bárcena, and F. Aguayo González, "On the sustainability of machining processes. Proposal for a unified framework through the triple bottom-line from an understanding review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 142. Elsevier Ltd, pp. 3890–3904, 20-Jan-2017.
- [84] G. Schütte, "What kind of innovation policy does the bioeconomy need," *New Biotechnology*, vol. 40. Elsevier B.V., pp. 82–86, 25-Jan-2018.
- [85] S. Al Aani, T. Bonny, S. W. Hasan, and N. Hilal, "Can machine language and artificial intelligence revolutionize process automation for water treatment and desalination," *Desalination*, vol. 458, pp. 84–96, 2019.
- [86] D. Gorecky, M. Khamis, and K. Mura, "Introduction and establishment of virtual training in the factory of the future," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 30, no. 1, pp. 182–190, 2017.
- [87] M. Karaköse and H. Yetiş, "A Cyberphysical System Based Mass-Customization Approach with Integration of Industry 4.0 and Smart City," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2017, pp. 1–9, 2017.
- [88] A. P. Calitz, P. Poisat, and M. Cullen, "The future African workplace: The use of collaborative robots in manufacturing," *SA J. Hum. Resour. Manag.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–11, 2017.
- [89] Smeraldinsight, "No Title," 2018. [Online]. Available: <http://www.emeraldgroupublishing.com/products/journals/journals.htm?id=whatt>.
- [90] K. Helmrich, "Future technologies that will drive Industry 4.0," 18 Jan 2019, 2019.
- [91] D. Preuveneers and E. Ilie-Zudor, "The intelligent industry of the future: A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0," *J. Ambient Intell. Smart Environ.*, vol. 9, no. 3, pp. 287–298, 2017.
- [92] H. P. Lu and C. I. Weng, "Smart manufacturing technology, market maturity analysis and technology roadmap in the computer and electronic product manufacturing industry," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 133, no. September 2017, pp. 85–94, 2018.
- [93] S. Mittal, M. A. Khan, D. Romero, and T. Wuest, "A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 49. Elsevier B.V., pp. 194–214, 01-Oct-2018.
- [94] M. Rodriguez-Salvador and J. Mancilla-De-La-Cruz, "Presence of Industry 4.0 on additive manufacturing: Technological trends analysis," *Dyna*, vol. 93, no. 6, pp. 597–601, 2018.
- [95] L. Ardito, A. M. Petruzzelli, U. Panniello, and A. C. Garavelli, "Towards Industry 4.0," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 25, no. 2, pp. 323–346, 2019.
- [96] K. Y. Lin, "User experience-based product design for smart production to empower industry 4.0 in the glass recycling circular economy," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 125, pp. 729–738, 2018.
- [97] M. Ghobakhloo, "The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0," *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 29, no. 6, pp. 910–936, 2018.
- [98] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, H. Parekh, and S. Joshi, "Modeling the internet of things adoption barriers in food retail supply chains," *J. Retail. Consum. Serv.*, vol. 48, no. December 2018, pp. 154–168, 2019.
- [99] A. B. L. de Sousa Jabbour, C. J. C. Jabbour, C. Foropon, and M. G. Filho, "When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 132, no. October 2017, pp. 18–25, 2018.
- [100] G. Kovacs and S. Kot, "New Logistics and Production Trends as the Effect of Global Economy Changes," *Polish J. Manag. Stud.*, vol. 14, no. 2, pp. 115–126, 2017.
- [101] J. Barata, P. Rupino, D. Cunha, and J. Stal, "Mobile supply chain management in the Industry 4.0 era: An annotated bibliography and guide for future research," *J. Enterp. Inf. Manag.*, vol. 31, no. 1, pp. 173–192, 1108.
- [102] J. O. Strandhagen, L. R. Vallandingham, G. Fragapane, J. W. Strandhagen, A. B. H. Stangeland, and N. Sharma, "Logistics 4.0 and emerging sustainable business models," *Adv. Manuf.*, vol. 5, no. 4, pp. 359–369, 2017.

Entendiendo el concepto de Innovación Social y las tendencias investigativas asociadas: Revisión de literatura

Diana K. Parrado H.¹

Lizeth F. Serrano C.²

Hugo F. Castro S.³

^{1,3} Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

² Universidad Católica de Colombia
Colombia

La innovación social se considera un fenómeno multidimensional que ha pasado en poco tiempo de ser emergente y marginal a ocupar una posición relevante en el discurso político y social. Este artículo tiene como propósito analizar el término Innovación Social (IS) a lo largo de la historia, determinando de esta manera su comportamiento y revisando las tendencias asociadas a la temática como un aporte a facilitar la implementación de iniciativas con estas características. De esta manera, se realizó una revisión sistemática de literatura en la base de datos Web of Science, utilizando la metodología de Revisión de Literatura y utilizando como apoyo el software de análisis cualitativo MAXQDA. Los resultados evidencian que el estudio de la Innovación Social es un tema de interés creciente, pero a pesar de su auge aún se hace necesario desarrollar futuras investigaciones que profundicen en la comprensión de la temática desde la práctica, en contextos particulares como los de Latinoamérica y Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

En la dinámica de globalización y cambio que enfrentan las sociedades, se hace evidente que los diferentes actores de los ecosistemas de innovación tienen el reto de transformarse con el propósito de enfrentar y superar los retos que se presentan en términos de diferenciación, hipercompetitividad, integración de nuevas tecnologías, escasez de recursos y la demanda creciente de productos y servicios innovadores [1]. Destacando a su vez, la necesidad de generar modelos de negocio que superen los esquemas tradicionales para competir [2]. En este contexto, la Innovación Social (IS) ha ganado atención e interés significativo en los últimos tiempos, su relevancia se evidencia en políticas como la implementada por el expresidente estadounidense Barack Obama quien generó un organismo de gobierno para este asunto denominado la “Oficina de la Innovación Social y Participación Ciudadana” [3]. En coherencia con esta iniciativa, la CEPAL argumenta que en varios países de América Latina y el Caribe las iniciativas sociales han permitido que en los últimos años comunidades luchan eficazmente contra la pobreza, la desigualdad y la exclusión social [4], muchas de estas iniciativas han sido destacadas por el concurso de Experiencias en innovación social, organizado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Dada la importancia del tópico, este artículo tiene como propósito la identificación de prácticas referencia para el desarrollo de iniciativas de innovación social. Entendiendo la innovación social como un fenómeno multidimensional que implica nueva forma de gestión, de administración, de ejecución de nuevos instrumentos o herramientas, que se orienten a mejorar las condiciones sociales y de vida de la población [5]. En un contexto cambiante como el actual, el interés por las prácticas de innovación social se ha desarrollado de una manera acelerada, captando cada vez más la atención en contextos políticos, sociales [6], científicos y económicos, al identificarse como una alternativa a los modelos de cambio, de transformación y desarrollo en la actualidad socioeconómica. El concepto de Innovación Social no es reciente, sus orígenes se derivan de las ideas y planteamientos de pensadores, como Benjamín Franklin y Robert Owen [7] quienes ya planteaban la necesidad de cambios en la estructura económica de las sociedades a través de la generación de valor bidimensional, desde la perspectiva económica y la perspectiva social.

Desde la perspectiva de algunos autores, la innovación social comenzó a ser utilizada como un término económico en la segunda mitad del siglo 20 en las obras de Drucker y Young [8] para otros autores, el origen de la innovación social como objeto de estudio se localiza en [9]. Posterior a los primeros estudios, se evidenció que la atención de la comunidad científica y política incrementó, hasta estudiarse cada vez con más regularidad, debido a su importancia en la generación de modelos más efectivos y eficientes en la creación de valor en los procesos, productos, servicios, iniciativas y proyectos que se generan bajo esta visión. Al respecto, se destaca el aporte de La Comisión Económica para América Latina y el Caribe [10], que argumenta que un factor clave en el surgimiento de innovaciones sociales es la participación directa de la comunidad afectada en la generación de soluciones de cambio ante sus propias problemáticas.

El concepto de Innovación Social ha llamado la atención no sólo en la política y la práctica, sino también en el ámbito académico, ejemplo de ello se evidencia, al analizar cómo en la base de datos multidisciplinar Web of Science en el año 2002 se publicaba tan solo un artículo y para el año 2018 ya se encuentran 91 artículos científicos publicados explícitamente sobre el tema. Sin embargo, a pesar de que el número de publicaciones científicas es incremental, aún no existe consenso académico acerca de su significado; por el contrario, se ha abordado como un concepto

¹ diana.parrado@uptc.edu.co

² lfserranoc@ucatolica.edu.co

³ hugofernando.castro@uptc.edu.co

extremadamente flexible, que puede ser abordado desde enfoques multidisciplinares [9]. Así, se destaca que el concepto se encuentra en fase de construcción, lo que complejiza la integración de su visión en iniciativas de transformación en la práctica. Ante este reto, esta investigación pretende generar un aporte al sintetizar la literatura precedente sobre el tema, reduciendo la curva de aprendizaje de los líderes que quieran implementar iniciativas con una visión de Innovación Social.

2. MÉTODO

La estructura de la investigación se fundamenta en la metodología de revisión de literatura propuesta de [12], quien sustenta que la revisión sistemática es una manera de evaluar e interpretar la investigación disponible sobre una temática, identificando elementos relevantes para dar respuestas a una pregunta de investigación particular. Según el autor, la metodología está conformada por tres etapas: la primera etapa de planificación de la revisión, en la cual se seleccionó el objetivo de la revisión, se estableció la pregunta de investigación y se delimitaron las fuentes de información. La segunda etapa, de desarrollo de la revisión, consiste en el análisis de la literatura considerando como referencia un protocolo de revisión, que integra criterios de inclusión y exclusión; en esta etapa se desarrolla un proceso de lectura a profundidad y de codificación de información. Por último, se encuentra la etapa tres, donde a partir de la información derivada de las fases anteriores, se estructuran los resultados obtenidos. La Figura 1 representa las etapas de la revisión de literatura desarrolladas en este estudio y la Figura 2 evidencia el proceso de filtrado y el número de documentos analizados en el ejercicio de revisión.

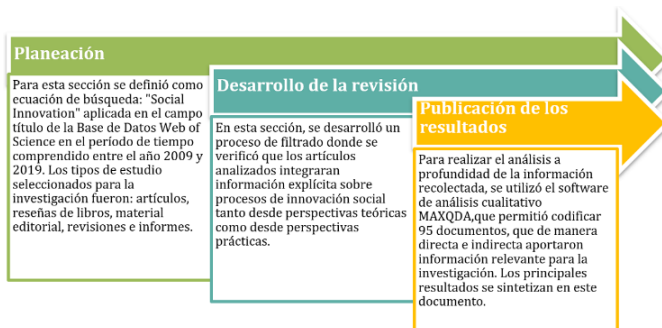


Figura 1. Estructura metodológica de la revisión de literatura tomando como referente la propuesta de [12]

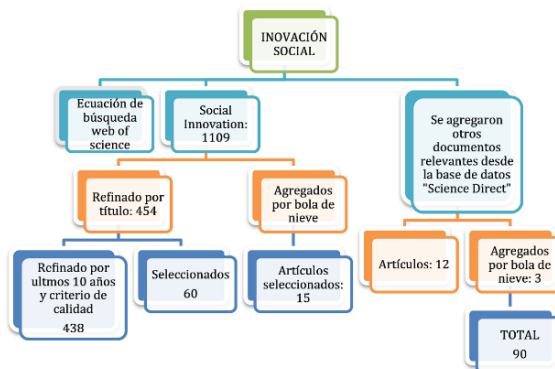


Figura 2. Proceso de filtrado realizado para el desarrollo de la revisión de literatura

Se destaca que, para el análisis de contenido de los 90 documentos seleccionados durante el proceso de filtrado, se utilizó el software de análisis cualitativo MAXQDA, que permitió codificar los resultados. Por último, se seleccionó el idioma inglés como criterio de búsqueda, según lo plantea [13] en la Figura 3.

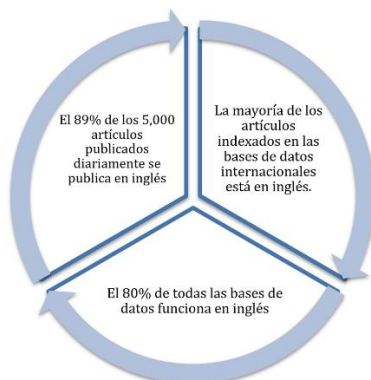


Figura 3. Inglés en las publicaciones científicas tomando como referencia [14]

3. RESULTADOS

La relevancia del estudio de la innovación se explica en su aporte en la generación de modelos de negocio que sean más efectivos y eficientes en la dinámica de creación de valor [5]. La primera definición de innovación fue acuñada por Schumpeter a finales de la década de 1920 quien destacó el aspecto de novedad en la conceptualización. Según Schumpeter, la innovación se refleja en resultados novedosos: un bien nuevo o una nueva calidad de un bien; un nuevo método de producción; un nuevo mercado; una nueva fuente de suministro; o una nueva estructura organizativa, que puede resumirse en "hacer las cosas de manera diferente" [14]. En el contexto de la innovación, se encuentra como relevante, la profundización en un tipo de innovación, donde se desarrollan soluciones que aportan a que la creación de este valor se realice desde dos perspectivas: económica y social, este tipo de innovación se denomina Innovación Social.

A pesar del auge que viene presentando la Innovación Social no existe consenso académico acerca de su significado, por el contrario, se evidencia como es un concepto extremadamente flexible, que puede ser abordado desde enfoques multidisciplinares [11]. Es por esto, que se destaca que el concepto se encuentra en fase de construcción, así como de búsqueda de consenso en cuanto a su definición, esta afirmación se puede corroborar en la literatura donde se muestra la evolución que se ha presentado en términos de publicación científica en los últimos años, en la Figura 4 se denota el comportamiento del término en la literatura en los últimos 10 años.

Al analizar la dinámica de publicación en el tiempo (Figura 4) se evidencia la tendencia creciente en términos de interés en la temática. Para el año 2015, la publicación de artículos sobre Innovación Social se duplicó y para el 2017 se triplicó, respecto a los años anteriores. Se encuentra que la mayor parte de las publicaciones se desarrollaron en idioma inglés (88,7%), seguido del español con (5,4%) y con un porcentaje más bajo alemán y portugués entre otros. Igualmente, se encontró que el país con mayor número de publicaciones sobre el tema es Estados Unidos, seguido de Inglaterra, España, Italia y Alemania.

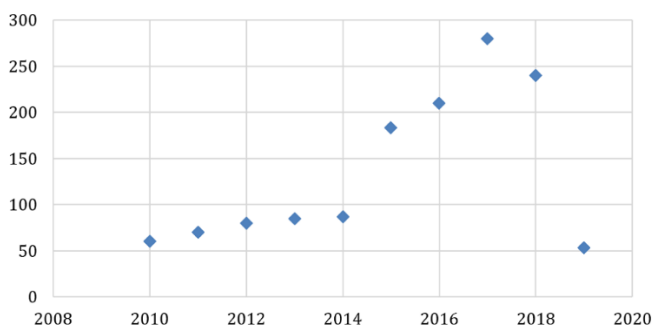


Figura 4. Artículos publicados en los últimos 10 años sobre Innovación Social considerando información bibliométrica en Wos

Para continuar con el análisis de comportamiento de la Innovación Social se generó el mapa de calor mostrado en la Figura 5. El mapa se construyó a partir de la ecuación de búsqueda: "Social Innovation" filtrada por título y últimos 10 años de publicación. Así, la información bibliográfica de los 438 documentos generados con este proceso fue procesada a partir del Software de Minería de Datos VosViewer® para analizar los autores más representativos en cuanto al número de publicaciones científica sobre el campo de conocimiento.

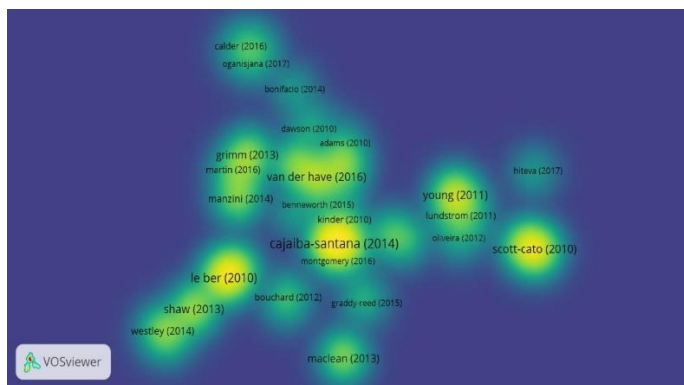


Figura 5. Mapa de calor con los autores más relevantes en el campo de conocimiento

Como se observa en la Figura 5, [16] es el autor más citado en los artículos sobre innovación social, en su documento "Social innovation: Moving the field forward. A conceptual framework" el autor pretende mediante un marco conceptual analizar la diferencia entre la innovación técnica y la innovación social, además de abordar a profundidad el concepto. El autor manifiesta que la mayoría de las investigaciones sobre el tema están vinculadas a iniciativas de emprendimiento social o de política pública, y que se hacen necesarios nuevos impulsores de la innovación social,

además, argumenta que la innovación no es sólo un mecanismo económico o un proceso técnico, por el contrario, se constituye en un fenómeno social [15]. Otra de las fuentes más referenciadas es *The Young Foundation*. Se encontró que esta institución trabaja diariamente para desarrollar comunidades mejor conectadas y más sostenibles en Reino Unido [17]. *The Young Foundation* es una institución no gubernamental, sin fines de lucro, que se especializa en la innovación social para hacer frente a la desigualdad estructural, esta institución fue creada por el pionero de la innovación social, el sociólogo británico Michael Young, quien defendía aprovechar el poder de la innovación social para hacer frente a las causas de origen de la desigualdad, otro de los artículos destacados, encontrado en el proceso de revisión es “*A methodological framework for measuring social innovation*” [18] quien especifica que las innovaciones sociales son soluciones nuevas (productos, servicios, modelos, mercados, procesos, etc.) que satisfacen simultáneamente una necesidad social (más eficazmente que las soluciones existentes) y conducen a capacidades y relaciones nuevas o mejoradas y / o un mejor uso de activos y recursos.

Complementario a lo anterior, se consolidó un mapa de relaciones entre las palabras clave propuestas por los autores en las publicaciones realizadas en la base de datos Web of Science, durante la línea de tiempo estudiada (Ver Figura 6). Se evidencia que en el 2013 el estudio de la innovación social se desarrolló asociado al análisis de redes sociales, la creatividad, el cambio climático y la inclusión social. En los años 2015- 2016, el estudio de la IS se orientó desde una perspectiva administrativa, integrando una visión empresarial a temáticas relacionadas con el desarrollo sostenible, evidencia de esta visión, es el documento elaborado por la CELAC [19] donde se analizan sistemas de innovación orientados al desarrollo rural sostenible en Latinoamérica y el caribe, a partir del análisis de los desafíos y las oportunidades de este sector.

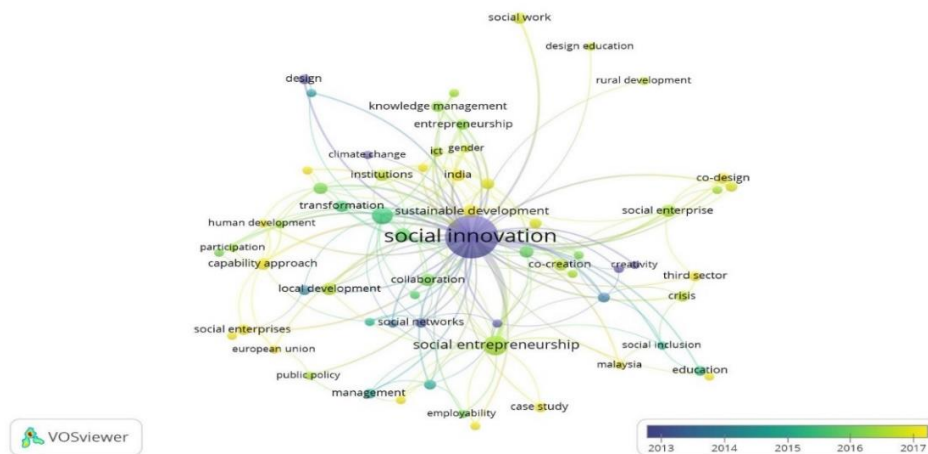


Figura 6. Mapa de relación de las palabras clave asociadas al campo de conocimiento

En el 2017 el estudio de la IS se focalizó a estudiar la aplicabilidad de la temática en áreas educativas, casos de estudio y empresas sociales donde se integrarán enfoques teóricos y prácticos. Uno de los documentos destacados, analizó la innovación social desde la perspectiva de los emprendedores [20], donde se destacan las características de estos y se manifiesta que el creador de valor social es capaz de identificar necesidades sociales, diseñar soluciones innovadoras, reducir su aversión al riesgo e identificar los recursos necesarios para materializar sus ideas en iniciativas de cambio.

La Figura 6 evidencia que el estudio de la Innovación Social está enfrentando una transición desde un enfoque completamente documental, a un enfoque práctico que integra la aplicación de herramientas como la colaboración en red (*co-design*) y el Diseño Centrado en Personas DCP, este último, considerado un enfoque multidisciplinar para el desarrollo de productos basados en las necesidades humanas [21], el enfoque DCP integra un proceso y un conjunto de técnicas que se usan para crear soluciones que integren las necesidades de comunidades o grupos sociales [22], estas soluciones incluyen productos, servicios, espacios, organizaciones y nuevos modos de interacción.

3.1 Conceptualización de la Innovación Social

Para algunos autores, la práctica de la Innovación Social no es un tema nuevo, la movilización de los individuos para proponer soluciones con el fin de resolver los problemas sociales complejos es de larga data en la historia [23], el documento de López [24] argumenta que el concepto de innovación social, tiene de hecho doscientos años de edad, para afirmar esto se recolectó información durante cinco años construye una base voluminosa de documentos, este investigador sugiere que el concepto debe su origen al socialismo en el siglo XIX, y su resurrección en el XXI, [25] afirma que el concepto de innovación social se hizo visible después de la Revolución Francesa y que sus dos representaciones principales eran el socialismo (radicalismo) y la reforma social (humanismo, igualitarismo).

En la actualidad, el termino se utiliza desde la perspectiva teórica con más frecuencia, [26] afirman que la innovación social es un concepto del que pocos están seguros de su significado, es por ello que a pesar del auge que viene presentando el concepto, no existe consenso académico acerca de su definición, por el contrario, se evidencia como

un concepto en construcción. La IS puede traducirse en un nuevo producto, un servicio, un proceso, un desarrollo del mercado, una plataforma, una forma de organización, un modelo de negocio (franquicia social), o una combinación de los anteriores, [27]. Sin embargo, el concepto de IS no sólo ha llamado la atención y el interés a nivel empresarial, social, o en las políticas y la práctica, sino también en el ámbito académico, pero debido a este interés, el campo de conocimiento es considerado como un gran laberinto [3]. En este contexto, diversos autores cuestionan la IS, enfatizando en qué no es más que una palabra de “moda”.

Según diversos autores la innovación social está vinculada exclusivamente a la iniciativa empresarial social y intraemprendimiento, otros afirman que IS se utiliza a menudo de manera intercambiable con los términos de emprendimiento social y las empresas sociales, y una tercera línea hace hincapié en que la innovación social puede ser llevada a cabo por diferentes actores, como los gobiernos,[3] las organizaciones sin fines profesionales o particulares, pero para la mayoría de los autores es evidente que una innovación social es relevante en la medida en que se oriente a valores sociales, no sólo a la productividad, la competitividad empresarial, los costes de producción o las tasas de mercado.

A diferencia de la innovación empresarial o tecnológica que persigue lucro y competitividad la innovación social busca satisfacer demandas grandes, medianas o pequeñas que mejoren el bienestar, las condiciones de vida, el nivel cultural, la igualdad e inclusión social o la sostenibilidad ecológica del territorio donde se interviene [28]. De hecho, la IS depende del contexto donde se utilice, es decir, siempre será una intervención condicionada por el entorno inmediato sobre el que se va a intervenir, por ello las Innovaciones sociales hay que entenderla como una geometría variable y calidoscópica de iniciativas y respuestas que admite muchas configuraciones, puede ser macro o micro, estructural o local y puede ser impulsada desde un espíritu empresarial o solidario [29].

Anteriormente se denotaba como los modelos de innovación tenían como finalidad la mejora de procesos y productos para conseguir algún beneficio económico y alcanzar determinado tipo de desarrollo social, bajo esta perspectiva se comienza a hablar de la innovación tecnológica y la innovación social, la una nutre su corpus teórico de la economía, mientras la segunda lo hace desde la sociología y otras disciplinas sociales.

Al analizar las conceptualizaciones en la literatura se encontró que las innovaciones sociales crean valor social, que surge de una mezcla de los esfuerzos y los fondos de diferentes partes interesadas [30], este tipo de innovaciones son relevantes en la medida en que se orienten a valores sociales, no sólo a la productividad, la competitividad empresarial, los costes de producción o las tasas de mercado [31]. Por ello dadas las condiciones actuales de la sociedad con un mundo globalizado, cambiante y con fuertes retos por afrontar [32], entre los que se destacan los grandes cambios sociales, políticos, económicos y humanos a los que se verá enfrentada la sociedad, se encuentra como relevante que los diferentes países desarrollen iniciativas de política que permitan el desarrollo y garanticen la prosperidad de la sociedad. En esta dinámica, la sostenibilidad y la innovación social atraen la atención mundial al aportar al desarrollo de soluciones para esta dinámica compleja [33]. La Innovación social tienen una influencia positiva en las personas, la sociedad y las organizaciones [33], razón que justifica su entendimiento como una práctica utilizada para hacer frente a los retos sociales, donde se valida que, en algunos contextos, la crisis es un impulsor de la innovación social, al movilizar actores para genera soluciones en red que aporten a la transformación sostenible [8].

La IS está interrelacionada con los objetivos de desarrollo sostenible ya que en muchos de los proyectos elaborados en la actualidad se pretende, dar fin a la pobreza, erradicar el hambre, agua limpia, igualdad de género, paz, acciones climáticas entre muchas otras, por este tipo de iniciativas se define la IS, es decir por el sector en el que se desarrolla más que por sus características propias y elementos diferenciales [9]. Así la Innovación Social se alimenta entonces de las necesidades sociales, experiencias y aprendizajes personales, colectivos y organizacionales, influidos por fenómenos y comunidades que necesitan generar cambio, es por ello que se resalta que la Innovación Social no es un término que aparece de la nada, sino que se produce en un contexto marcado por importantes cambios, económicos, políticos y sociales que van en contravía de los presupuestos tradicionales del desarrollo.

En la Figura 7, se encuentran los conceptos de innovación social más relevantes a lo largo de la historia, que aportaron a la construcción de esta revisión de literatura y a identificar una conceptualización más exacta sobre el tema. Se evidencia que la mayoría de los autores expuestos convergen en que la Innovación Social es un proceso que pretende solucionar rupturas y fenómenos en la sociedad, así como genera valor económico y social mejorando la comunidad donde se impacta, generando un estado de bienestar, y cuyo objetivo primordial es el cambio social. Complementario a lo anterior, Estrada [9] aporta un concepto más amplio donde se involucran a la IS como procesos destinados a la solución de problemas sociales específicos, en la organización política y social, en la justicia, la salud, el trabajo entre otras.

Por lo anterior, la innovación social es conocida como la nueva práctica utilizada para hacer frente a los retos sociales; tienen una influencia positiva en las personas, la sociedad y las organizaciones [33], a través de la generación de nuevos modelos, servicios, productos, iniciativas y proyectos que generen respuestas propositivas ante demandas sociales y económicas.

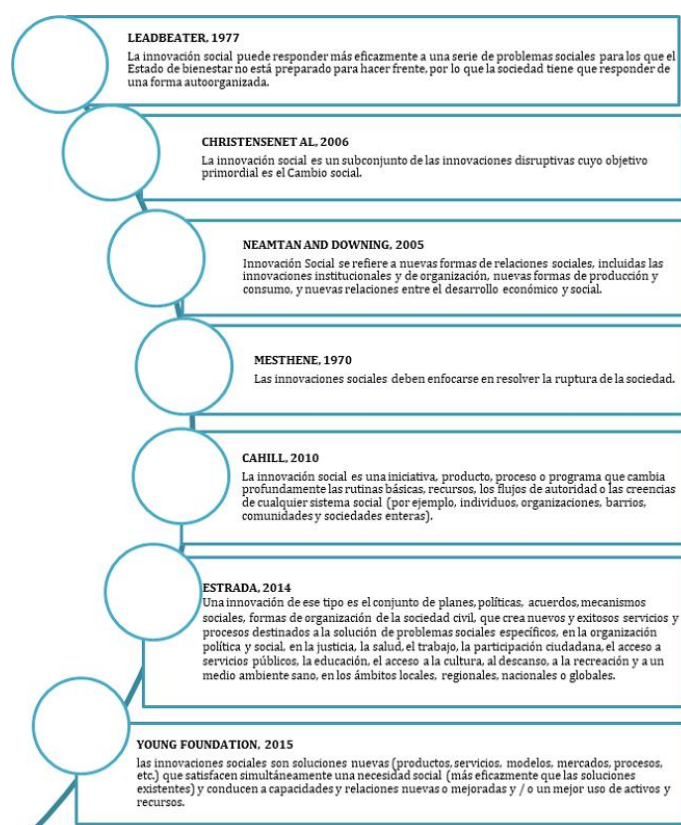


Figura 7. Conceptos que aportaron a la construcción del término IS [9]

3.2 Instituciones y Agencias públicas de Innovación Social

La innovación social recibe un decidido impulso por parte de ciudades, universidades y Estados más atentos a los cambios sociales, creando institutos y agencias públicas para impulsarla y analizarla. En la Tabla 1 se sintetizan algunas de estas iniciativas.

Tabla 1. Instituciones y Agencias públicas de Innovación Social tomando como referencia informe de la CEPAL [34]

Organización	Descripción
The Young Foundation	Institución sin fines de lucro, que se especializa en la innovación social para hacer frente a la desigualdad estructural, para hacer frente a las causas de origen de la desigualdad.
Red INNOVEMOS, UNESCO	Espacio interactivo y foro permanente de reflexión, producción, intercambio y difusión de conocimientos y prácticas acerca de las innovaciones y el cambio educativo.
Iniciativa de Innovación Social (CAF)	Espacio de experimentación que captura ideas, procesos, dinámicas y/o modelos para el desarrollo de soluciones útiles y sostenibles a desafíos sociales que aquejan a la región.
Laboratorio de Innovación, BID	Herramienta para mejorar la equidad en América Latina y el Caribe, ha desarrollado una metodología a través de la cual los propios ciudadanos definen y priorizan sus problemas, y luego se conectan con quienes tienen las capacidades, intereses y recursos para proponer soluciones.
Iniciativa Ecuatorial	Sociedad que reúne Naciones Unidas, gobiernos, sociedad civil, empresas, y organizaciones para construir capacidades y elevar el perfil de esfuerzos locales tendientes a reducir la pobreza.
Centro de Investigación sobre Innovaciones Sociales (CRISES)	Los miembros del CRISES trabajan con el fin de producir y difundir los nuevos conocimientos relativos a las innovaciones y transformaciones sociales.
Centro para la Innovación Social (Zentrum für Soziale Innovation)	ZSI realiza investigación sobre el conjunto social y el impacto de todos tipos de innovaciones, y contribuye al diseño y difusión de innovaciones socialmente aceptadas y sostenibles para confrontar desafíos sociales. Con el despliegue de investigaciones innovadoras, educación, servicios asesores y coordinación de redes.
Sozialforschungsstelle, Universidad Politécnica de Dortmund	Las diversas áreas de trabajo incluyen: refinar el concepto de IS en cuanto a su contenido y su concepto, analizar los procesos y problemas, desarrollar las posibles soluciones con la perspectiva de IS.
Centro para Innovación Social, Universidad Stanford	Su misión es producir cambios sociales y medioambientales en el mundo. A través de investigación, educación y conocimiento experiencial.
Laboratorio de Innovación, Universidad de Harvard	El Laboratorio de Innovación es específicamente creado para los emprendedores dedicados a crear un impacto social. Organiza talleres especializados en emprendimiento social y cultural, y en programación.
Centro Bertha para la Innovación Social y Emprendimiento, Sudáfrica	Fundación que trabaja con líderes inspiradores para el fomento de cambios sociales y económicos, y derechos humanos. Su misión es perseguir el impacto social hacia la justicia social en África, a través de enseñanza, construcción de conocimiento, reuniones, y proyectos catalíticos.

Las anteriores instituciones se pueden subdividir en tres periodos que explican su trayectoria, el primer periodo se desarrolla a partir de los años cincuenta, con el *Institute for Community Studies* (1954) que en el 2005 se fusionó con el Centro de ayuda mutua y pasó a llamarse The Young Foundation en honor a su creador el sociólogo Michael Young.

A partir de allí nacen otras instituciones como CAF, CRISES y ZSI que vienen trabajando para producir y difundir los conocimientos de la IS entre los años 80 y 90. El último periodo se genera desde el año 2000, cuando la Universidad de Stanford, crea un centro de investigación académica sobre innovación social seguida por otras universidades anteriormente citadas en la Tabla 1. Adicional a lo anterior, se encuentra que a partir de 2009 se publican los primeros documentos e informes de la Unión Europea para incluir la innovación social como eje transversal de actuación de los programas comunitarios de empleo y cohesión social [28].

3.3 Etapas de la Innovación Social

Las iniciativas de IS para hacer frente a los diversos y complejos retos económicos y sociales actuales está creciendo a un ritmo acelerado, el creciente interés por la Innovación Social trae consigo también cada vez mayor necesidad de mecanismos para determinar los tipos de enfoques más efectivos, a la vez que se estudia su impacto, influencia y viabilidad a largo plazo. Para diversos autores la implementación de IS cuenta con seis etapas que incluyen el diagnóstico del problema; la generación de propuestas; el desarrollo de un prototipo y su consiguiente modelo de negocio, y una estrategia de ampliación, que eventualmente puede llegar a provocar un cambio sistémico [35] como se observa en la Figura 8.



Figura 8. Espiral de la Innovación Social tomando como referente [35]

Cada una de estas etapas cuenta con mecanismo de medición para analizar su impacto en la comunidad en la que se implementa [35]:

1. *Diagnóstico y análisis* (avisos): evaluación participativa, investigación aplicada, modelos de pensamiento sistémico, peticiones en línea.
2. *Propuestas e ideas*: encuestas a los usuarios, votaciones online y wikis, bancos de ideas y buzones de sugerencias, foros, asambleas y comisiones de ciudadanos.
3. *Prototipos y pruebas piloto*: pruebas controladas aleatorias, pruebas beta y pruebas abiertas, prototipos lentos y rápidos, encuestas a usuarios
4. *Desarrollo del modelo de negocio* (Mantenimiento): análisis de los ingresos y los resultados, evaluación de la inversión versus el impacto social, cuadro de mando integral e informes.
5. *Ampliación y difusión* (despliegue): Matrices de contabilidad social, uso de franquicias y licencias, beneficio de la inversión social, contabilidad de valor compartido, auditoría social.
6. *Cambio sistémico*: Comparativa de resultados; existencia de nuevos sistemas de producción, distribución, regulación y consumo

Las diversas etapas de la IS como se muestra anteriormente cuentan con herramientas para su medición individual, sin embargo, no existen fórmulas universales para medir el impacto social de la Innovación Social.

3.4 Innovación Social en el mundo

En el contexto global el mundo se encuentran diversas organizaciones dedicadas a mejorar la sociedad mediante la implementación de la IS, como Ashoka, organización global, independiente y sin ánimo de lucro que apoya el trabajo innovador de más 3.000 emprendedores sociales en más de 80 países, creando una red internacional de emprendedores sociales innovadores y construyendo una sociedad de ciudadanos que sean agentes del cambio social. Ashoka [36] reúne y cultiva una comunidad de líderes que reconocen que en el mundo de hoy es necesario que se generen iniciativas para que más personas se transformen en agentes de cambio. Por otra parte, se identificó la fundación Avina, organización que busca contribuir al desarrollo sostenible fomentando la construcción de vínculos y alianzas entre líderes, emprendedores sociales y empresariales; y articulando agendas de acción consensuadas entre actores del ecosistema de innovación [37].

Actualmente el Parlamento Europeo estableció que Europa necesita impulsar su capacidad de creatividad e innovación, por motivos tanto sociales como económicos además que el Consejo Europeo ha reconocido en repetidas ocasiones que la innovación es fundamental para que Europa enfrente efectivamente los desafíos de la globalización, es así que la comunidad europea destaca que las innovaciones sociales deberían tener por lo menos los ítems de la Figura 9 [40].

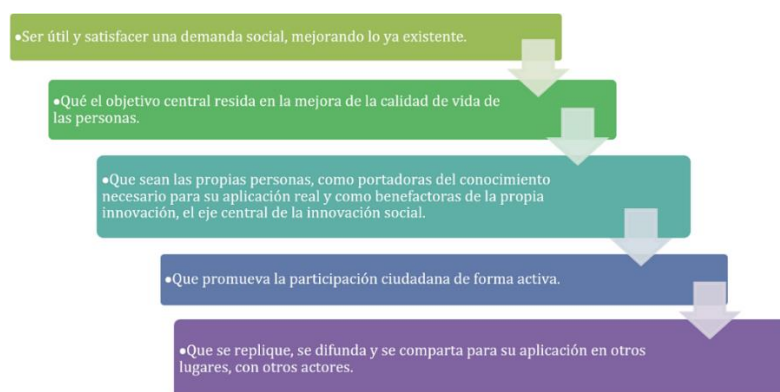


Figura 9. Claves que debieran darse en toda innovación social tomando como referente [40]

La comisión Europea afirma que Recientemente, la Innovación Social ha recibido mucha atención tanto en los círculos políticos y de investigación [38], el interés por la innovación social está relacionado con factores como la crisis económica y social, el envejecimiento de la población, la fuerte competencia mundial, la tecnología, la migración y el desempleo [32], estas condiciones justifican el creciente atractivo de la innovación social como instrumento de política que se utilizará para hacer frente a los cambios sociales, un ejemplo claro de esto es la serie de organizaciones y redes de innovación social que han surgido en Europa en los últimos años para abordar los desafíos cada vez más complejos que enfrenta la sociedad, ejemplo de ello es la “social innovation community” [39] encargada de fortalecer, conectar y hacer crecer las comunidades de innovación social existentes, incluida la innovación del sector público y la innovación social digital.

3.5 Innovación Social en Latinoamérica

En América latina, una de las regiones más ricas del mundo, en términos de biodiversidad natural y cultural, se encuentra que el panorama de la Innovación Social [41] es prometedor, explicado en que los países de la región presentan retos asociados a sus elevados índices de pobreza y desigualdad, donde los recursos del estado son insuficientes para suplir las necesidades básicas de sus ciudadanos, y donde se hace necesario que se generen ecosistemas de cambio fundamentados en la Innovación Social, donde redes de actores desarrollen iniciativas que aporten a mejorar la calidad de vida en sus zonas de influencia.

En Latinoamérica, son evidentes los problemas de inclusión social y pobreza extrema, donde la mayoría de las población no alcanza a satisfacer sus necesidades más básicas, y las que lo logran lo hacen con baja calidad, es por ello que en toda la región se dan esfuerzos por superar estos aspectos, así, se han diseñado programas con enfoque de Innovación Social, entre los que se encuentran las “antenas de innovación” [40] que buscan fomentar y dar a conocer las diferentes innovaciones que se desarrollan en la región, estas organizaciones dedican una parte de sus recursos financieros, además del conocimiento técnico, al asesoramiento y el *networking*, para promover iniciativas de cambio en la región. Según los planteamientos de [41], alrededor de 3.600 proyectos de innovación fueron implementados en Latinoamérica y el Caribe entre los años 2005 y 2007, de los cuales la mayor parte son valiosos, e integran aprendizajes y enseñanzas. A pesar de lo anterior, la cobertura y el impacto de la innovación proveniente de América Latina y el Caribe aún es muy baja por razones estrictamente prácticas, dado que solo genera impactos en una pequeña muestra de la población.

Otros de los movimientos latinoamericanos destacados es La Red de Tecnología Social de Brasil (RTS, Rede de Tecnología Social). El objetivo de esta red es ampliar la difusión y re aplicación de las tecnologías sociales, permitiendo la inclusión social [42], la creación de puestos de trabajo e ingresos y la promoción del desarrollo local sostenible, se encontró que más de 900 organizaciones se unieron a la RTS, incluidas organizaciones no gubernamentales, universidades, empresas privadas y organizaciones estatales de Brasil y otros países de América Latina.

La iniciativa de la (CEPAL) y la Fundación W.K. Kellogg permite advertir que en América Latina existen diversas innovaciones sociales en marcha, en áreas tales como educación, salud, superación de la violencia, equidad de género entre muchas otras problemáticas, la mayor parte de esas innovaciones no son suficientemente visibles y reconocidas, encontrando que incluso en algunas ocasiones ni los mismos actores y agentes que son sus protagonistas conocen que están ante una iniciativa de IS [41]. Pero, aun así, el continente está apostando a la innovación social con organizaciones consolidadas, como [37] y [36], que promueven las redes de la sociedad civil y las iniciativas de emprendedores sociales, desarrolladas bajo un enfoque de IS.

3.6 Innovación Social en Colombia

Los atrasos económicos y la baja sofisticación que caracterizan los mercados de la región, hacen que Colombia considere la innovación social como un tema relevante, por ello, su implementación está consignada tanto en planes

gubernamentales de desarrollo como en iniciativas lideradas por el sector privado [43], donde se reconoce que la innovación social se constituye en un mecanismo para desarrollar soluciones novedosas a los problemas sociales aportando a los retos de reducción de la pobreza y mejoramiento de las condiciones de vida de la población.

El informe Panorama actual de la innovación social en Colombia [43], entrega información sobre los programas y políticas públicas de IS tanto a nivel Nacional, regional y local que son impulsados tanto por el sector público como por la empresa privada, este informe afirma que Colombia es uno de los pocos países en el mundo que cuenta con un Centro de Innovación Social en el sector público, y destacando que se ha incluido la IS en su agenda Nacional desde el año 2007, y desde 2010 como parte del Plan Nacional de Desarrollo. A pesar de su relevancia, se identificaron cuatro grandes limitaciones [44]:

1. El marco institucional y de política pública existente no desarrolla instrumentos suficientes para el fomento de la IS, por lo tanto, no se genera un ambiente favorable para su desarrollo.
2. Débil gestión del conocimiento en IS, que no permite de esta manera un entorno fácil para su replicabilidad, ya que no se consolidan evidencias de los resultados obtenidos tras su aplicación.
3. Se dificultan los servicios de soporte, financieros y técnicos, asociados al apoyo del emprendimiento e innovación.
4. Baja participación ciudadana y comunitaria en los procesos de innovación, situación que debilita los alcances e impactos de las iniciativas de Innovación Social.

A pesar de los retos anteriores, se encuentra como relevante destacar el Programa de IS Participativa colombiano, que ha desarrollado siete proyectos que se indican a continuación [43]: Saco Crea, Moisés, Organización de mujeres jóvenes para la creación de negocios sociales, Innovación rural participativa, Agua para la educación, educación para el agua, Transformando y Plano Vivo. Estos proyectos son realizados en la actualidad en diversos departamentos como Atlántico, Antioquia, Bolívar, Cundinamarca y Magdalena, en los cuales se integran mujeres cabeza de familia, familias de escasos recursos, y personas en situación de vulnerabilidad.

Complementario a lo anterior, se encontró que si bien el tema de IS se oficializó en las políticas públicas en Colombia partir de 2010, ya era conocido con anterioridad, liderado por el sector privado, social y académico, es por esto que algunas organizaciones cuentan con una mayor experiencia en IS que el mismo gobierno, colaborando con la financiación de iniciativas de IS en alianzas público-privadas [43]. Dentro de estas iniciativas se destaca "Pioneros de la Innovación Social", alianza público-privada que empezó a idearse en 2011 por iniciativa del sector público, la Alianza Pioneros se pensó como un fondo de IS para financiar la etapa temprana, el prototipado y la validación de soluciones de mercado para la pobreza extrema.

Para concluir, se evidencia que al analizar la IS en el caso colombiano se ha abordado con especial interés desde el sector académico, justificado en el creciente número de programas que dan cuenta de su aporte al fomento de las iniciativas de innovación social [40], como lo son el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) quien lanzó para el año 2012 el laboratorio de Innovación Social como un proyecto desarrollado dentro del grupo de investigación, este laboratorio se orienta a ofrecer soluciones en el diseño, ejecución y seguimiento de proyectos que estén conectados con desarrollo empresarial, empleo formal y bienestar social. También se encuentra el programa Banco de Proyectos de IS de la Universidad Nacional de Colombia el cual tiene como finalidad desarrollar proyectos de IS que favorezcan la interacción con la comunidad y contribuir así a la solución de problemas nacionales. En esta iniciativa, mediante convocatorias se busca generar soluciones innovadoras y sostenibles a problemas planteados. Estas dos iniciativas son ejemplo del aporte de las instituciones de educación superior tanto en la construcción del concepto de IS como en su replicabilidad e implementación.

4. CONCLUSIONES

El análisis realizado del fenómeno de la innovación social, permite concluir que el concepto no cuenta aún con un consenso académico sobre su definición, pero a medida del tiempo ha ido adquiriendo una independencia de la definición genérica de innovación, de esta manera se destaca que a lo largo del tiempo se han generado variedad de definiciones que hacen complejo encontrar una conceptualización en la que coincidan los autores, pero en el proceso investigativo, se pudo evidenciar que las múltiples definiciones coinciden en que la IS pretende generar desarrollo en la comunidad donde se implementa, mediante la creación de un nuevo producto, un servicio, un proceso, un desarrollo del mercado, plataforma u forma de organización. Este tipo de innovación a diferencia de la innovación empresarial o tecnológica no persigue como única base la rentabilidad, en cambio busca satisfacer demandas grandes, medianas o pequeñas que mejoren el bienestar, las condiciones de vida y el nivel cultural de la comunidad donde se implementa. Es importante destacar que, la innovación social recibe un decidido impulso por parte de instituciones Universidades y Estados interesados en el cambio social, creando institutos, fundaciones u organizaciones tanto públicas y privadas que apoyan el estudio, propagación, intercambio y difusión de conocimientos y prácticas acerca de las innovaciones, la mayoría de estas organizaciones son sin fines de lucro y buscan contribuir a la desigualdad estructural.

De la misma manera se destaca como el concepto de IS ha llamado la atención en el ámbito académico, pasando de publicar tan solo 1 artículo en el año 2002 a 91 para el año 2018, siendo el idioma inglés el más utilizado con un 88,7%, debido a su creciente estudio, la Innovación Social es considerada por algunos autores como una palabra de moda, sin embargo, su reconocimiento formal en el ámbito académico es realmente reciente, como lo es también su incorporación como enfoque utilizado en instituciones y políticas públicas, en particular en el contexto latinoamericano.

A partir del auge de la innovación social, han nacido gran cantidad de organizaciones y proyectos con el fin de dar solución a las problemáticas sociales que se dan a consecuencia de las desigualdades, la inestabilidad económica y los problemas ambientales, estas instituciones han emergido para promover soluciones a los problemas que ni el mercado, ni el sector público han podido resolver de manera tradicional.

Para su difusión e implementación en el mundo la IS está siendo apoyada por variedad de estados, instituciones y organizaciones, sin embargo, para el caso colombiano si bien se ha venido avanzando en el desarrollo de instrumentos de política pública de IS y de la movilización de los actores que la posibilitan, la IS no ha logrado posicionarse con la fuerza necesaria, por ello esta iniciativa está llamada a formar parte de los objetivos para encontrar un país más incluyente y amigable.

Finalmente, se encuentra que una de las características que diferencia a la Innovación Social de otras innovaciones se refiere a que este tipo de innovación no solo es "social" en sus fines (tienen un qué), sino también en sus medios (tienen un cómo) es decir, tiene como punto de referencia las necesidades sociales que requieren respuestas alternativas a las ya existentes, y genera valor desde la perspectiva económica.

REFERENCIAS

- [1] K. L. Álvarez Pulido, L. F. Serrano Cárdena and E. R. Bravo Ibarra, "Innovación En Salud: Revisión De Literatura," *Dimensión Empresarial*, vol. 15, no. 1, pp. 43-61, jun., 2017.
- [2] R. & M. C. Rust, "What academic research tells us about service? Communications of the ACM.," *Services Science.*, pp. 49-54, Jul., 2006.
- [3] G. Eicheler and E. Schwarz, "What Sustainable Development Goals Do Social Innovations Address? A Systematic Review and Content Analysis of Social Innovation," *Sustainability*, vol. 11, Ene., 2019.
- [4] CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, "Exitosas iniciativas de innovación social se presentan en Estados Unidos," (2010). [Internet] Disponible en <https://www.cepal.org/es/comunicados/exitosas-iniciativas-innovacion-social-se-presentan-estados-unidos>
- [5] CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, (2017). [Internet]. Disponible en <https://www.cepal.org/es/temas/innovacion-social/acerca-innovacion-social>.
- [6] J. Abreu, "Innovación social, conceptos y etapas, Daena" *International Journal of Good*, vol.6, no. 1, pp. 134-148, oct., 2011.
- [7] A. C. Morales, "La innovación social: un ámbito de interés para los servicios sociales", *Revista de servicios sociales*, jun., 2009.
- [8] A. Vasilevich Popov , T. Sergeevna Solov and H. Li, "La innovación social en España, China y Rusia: aspectos clave del desarrollo," *VolRC RAS*, vol. 11, no. 2, pp. 52-68, 2018.
- [9] A. Hernández, P. Tirado Valencia, and A. Ariza Montes, "El concepto de innovación social: ámbitos, definiciones y alcances teóricos", *CIREC España, revista de economía pública, social y cooperativa*, no. 88, pp. 156-100, dic 2016.
- [10] CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, (2018). [internet]. Disponible en <https://www.cepal.org/es/temas/innovacion-social/acerca-innovacion-social>.
- [11] J. Hernández Ascanio, P. Tirado Valencia and A. Ariza Montes, "El concepto de innovación social: ámbitos, definiciones y alcances teóricos," *CIRIEC-España, Revista de Economía CIRIEC-España, Revista de Economía*, no. 88, pp. 164-199, 2016.
- [12] A. Caro, *Revision Sistemática de Literatura*, (2008). [internet]. Disponible en <http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/182/presentacion/Presentaci%C3%B3n-ColoquioUBB1.pdf>.
- [13] K. Englander, "El mundo globalizado de las publicaciones científicas en inglés: Un enfoque analítico para comprender a los científicos multilingües", *Discurso y sociedad*, vol. 3, no. 1, pp. 90-118, 2009.
- [14] M. M. Crossan and M. Apaydin, "A Multi-Dimensional Framework of Organizational Innovation: A Systematic Review of the Literature," *Journal of Management Studies*, jun., 2010.
- [15] S. Žičkienė and T. Tamošiūnas, "INNOVACIÓN SOCIAL concepto y su aplicación en la Unión Europea y en la República de Lituania," (2018). [Internet]. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/174/17449696006.pdf>. [Accessed 15 sept. 2015].
- [16] G. Cajaiba Santana, "Social innovation: Moving the field forward. A conceptual framework," *Technological Forecasting & Social Change*, no. 82, pp. 42-51, 2014.
- [17] T. Y. Foundation, "The Young Foundation," (2019) [Internet]. Disponible en <https://youngfoundation.org/about-us/vacancies/>. [Accessed 5 04].
- [18] E. Bund, G. Ulrike, M. Hoelscher and G. Mildenerger, "A methodological framework for measuring social innovation," *GESIS - Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften*, vol. 3, no. 40, pp. 48-78, 2015.
- [19] Comunidad de Estados Latinoamericanos y Caribeños, "Sistemas De Innovacion Para El Desarrollo Rural Sostenible," *CELAC*, Chile, (2017). [Internet]. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i7769s.pdf>

- [20] S. Escamilla Solano, N. A. Martínez Losa. and P. Plaza Casado, "Emprendimiento Social," *revista de estudios de juventud*, no. 118, 2017.
- [21] M. Trujillo Suarez, J. J. Aguilar MSc and C. N. MD, "Los métodos más característicos del diseño centrado en el usuario -DCU, adaptados para el desarrollo de productos materiales," (2016). [Internet]. Disponible en file:///C:/Users/NeiderFavian/Downloads/Dialnet-LosMetodosMasCaracteristicosDelDisenoCentradoEnEU-6302030.pdf.
- [22] Kit de Herramientas DCP (2016). [Internet]. Disponible en http://d1r3w4d5z5a88i.cloudfront.net/assets/guide/Field%20Guide%20to%20Human-Centered%20Design_IDEOorg_Spanish-ffa025302066d08eb3247093e1f3a93.pdf.
- [23] F. Cardoso Romão Freitas and F. Domingues, "Contributions of social innovation to deal with the challenge of global increasing longevity," *RISUS - Diario de Innovación y Sostenibilidad*, vol. 8, no. 4, pp. 181-199, 2017.
- [24] G. A. Lopez Isaza, "Innovación: lo social le es immanente" *rev.fac.cienc.econ.*, vol. XXII, no. 2, pp. 123-158, 2014.
- [25] B. Godin, "Project on the Intellectual History of Innovation Working Paper," vol. 1, 2008.
- [26] S. Ville and E. Pol, "La innovación social: palabra de moda o término duradera," *El Journal of Socio-Economics*, vol. 6, no. 38, pp. 878- 885, 2009.
- [27] J. Echaverría, "El Manual de Oslo y la innovación social," *ARBOR Ciencia, Pensamiento y cultura.*, pp. 609-618, Ago 2008.
- [28] X. Martínez Celorrio, "La innovación social: orígenes, tendencias y ambivalencias," *SISTEMA 247*, jul 2017.
- [29] J. Nussbaumer and F. Moulart, "L'innovation sociale au coeur des débats publics etscientifiques," Universidad de Québec, pp. 71-88, 2007.
- [30] S. Žičkienė and T. Tamošiūnas, "Innovación Social concepto y su aplicación en la Unión Europea y en la República de Lituania," pp. 43-58.
- [31] A. Quintero and J. Luis, "Innovación Social: Conceptos y Etapas (Social Innovation: Concepts and Stages)," *Daena: International Journal of Good Conscience.*, vol. 6, no. 2, pp. 134-148, 2011.
- [32] Y. N. Harari, *21 lecciones para el siglo XXI*, penguin Random House Grupo Editorial S.A.U. (Impreso en editorial Geminis S.A.S.), (2018).
- [33] R. Morrar, H. Arman and S. Mousa, "The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0): A Social Innovation Perspective," *Technology Review Gestión de la Innovación*. vol. 7, no. 11, 2017.
- [34] CEPAL, "Comisión Económica para América Latina y el Caribe," (2018) [Internet]. Disponible en <https://www.cepal.org/es/temas/innovacion-social/instituciones-innovacion-social>.
- [35] H. Buckland and D. Murillo, "La Innovación Social en América Latina Marco conceptual y agentes," (2014). [Internet]. Disponible en http://proxmy.esade.edu/gd/facultybio/publicos/1431613105032_ESADE-FOMIN-La-innovacion-social-en-America-Latina-Marco-conceptual-y-agentes-1.pdf. [Accessed 35 03 2019].
- [36] Ashoka, "Ashoka," 2019. [Online]. Available: <https://www.ashoka.org/es>. [Accessed 19 Abril 2019].
- [37] AVINA, "Avina,"(2019) [Internet]. Disponible en: <http://www.avina.net/avina/>.
- [38] E. commission, "ESF performance and thematic reports the esf support to social innovation final report," *European Commission*, BELGIUM, 2018.
- [39] Social Innovation Community, (2019)[Internet]. Disponible en <https://www.siceurope.eu/>.
- [40] J. E. Parada Camargo, F. A. Ganga Contreras and Y. Y. Rivera Jiménez, "Estado del arte de la innovación social: una mirada a la perspectiva de Europa y Latinoamérica," *Biblioteca Digital Repositorio Académico*, no. 82, pp. 563- 587, 2017.
- [41] A. Rodríguez Herrera and H. Alvarado Ugarte, "Claves de la innovación social en América Latina y el Caribe," (2008). [Internet]. Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2536/S0800540_es.pdf?sequence=1
- [42] M. L. Guillen Diaz, "Innovación Social como herramienta de Desarrollo social.," Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano., Colombia, -3, Jun. 2017.
- [43] L. Villa and J. Melo, Panorama actual de la innovación social en Colombia, Colombia: *Banco Interamericano de Desarrollo.*, Colombia, May. 2015.
- [44] A. Allamand, S. Aparicio, J. Aria, M. E. Bernal, A. Caicedo, N. Currea, D. Domanski, A. Gordon, C. Guaipatin , N. Frias, H. Moreno Garbiñe, I. Hernández, J. Howaldt, C. Huenchuleo, C. Kaletka, M. Lozano , N. Monge, F. Peirano , S. Perry, G. Quitiaquez, D. Rocha , L. Schwartz , M. C. Sleima and P. Villalobos, "Innovación Social en Latinoamérica," Dmitri Domanski, Nicolás Monge, Germán Quitiaquez, Daniel Rocha, 2016.

Nivel de implementación de prácticas Gestión de la Calidad Total en pequeñas empresas colombianas

Stanley D. Álvarez E.¹

Daniel A. La Rotta F.²

Universidad de Antioquia – Colombia

La Gestión de la Calidad Total (TQM) ha surgido como una importante herramienta que permite a las empresas obtener mejores resultados. Sin embargo, algunos estudios han mostrado que el TQM ha presentado algunas fallas en cuanto a la implementación de prácticas. Por lo tanto, el propósito de esta investigación es identificar las prácticas TQM con mayor y menor nivel de implementación en pequeñas empresas del sector “Confección de prendas de vestir” de la ciudad de Medellín, Colombia. Para ello, se desarrolla una investigación exploratoria con una fase cualitativa, en la que se revisa la literatura, se adopta una definición y principios TQM y se identifican las principales prácticas TQM usadas en entornos empresariales; y una fase cuantitativa, para determinar las prácticas con mayor y menor nivel de implementación. Así, se obtienen como resultado 11 prácticas TQM con mayor nivel de implementación y 11 prácticas TQM con menor nivel en las empresas del estudio. Este hallazgo, pretende apoyar la toma de decisiones de los Gerentes/Directores, identificando las actividades que se encuentran potenciadas y aquellas que requieren de mayor atención en la empresa, para lograr una mejor implementación del TQM y con esto, poder alcanzar sus objetivos.

1. INTRODUCCIÓN

El mundo actual exige cada día a las empresas mayores niveles de competitividad. Es por esto que, la calidad de los procesos, productos o servicios se ha hecho indispensable para sobrevivir de manera sostenible en el mercado. La Gestión de la Calidad Total (de siglas inglesas TQM), aparecida alrededor de los años 1980s, se vuelve un importante vehículo para lograrlo. En su evolución, ha sido conceptualizada de diversas maneras, algunas de ellas la han considerado como un esfuerzo para obtener una ventaja competitiva y mayores niveles de excelencia, mediante la mejora continua de aspectos de la cultura organizacional [1], [2]. Otras la definen como un sistema de gestión que evoluciona en el tiempo, cuyo propósito es aumentar la satisfacción de los grupos de interés [3]. Otros, la ven como una filosofía orientada a los procesos de mejora de la satisfacción del cliente a través de la producción de bienes y servicios de mejor calidad [4]. Todas esas definiciones que se registran en la literatura, pueden tener enfoques diversos, lo que podría generar perspectivas diversas sobre su comprensión y, a su vez, ocasionar una posible dificultad para implementar al TQM.

Independientemente de su conceptualización, este término ha mostrado gran acogida en el entorno empresarial [5], pues facilita a quienes la usan de forma acertada, alcanzar mejores resultados empresariales, a partir de su gestión y fundamentándose en sus preceptos básicos [3], [6] - [8]. Es así como, a nivel pragmático, incluso las grandes potencias económicas han usado los principios del TQM como base para desarrollar modelos de gestión. De esta manera, se han originado modelos muy conocidos como el Malcolm Baldrige en Norteamérica, el modelo Deming Prize en Japón, el modelo EFQM en Europa, entre otros. Igualmente, ha surgido también el estándar ISO 9000:2015 que se constituye como una norma para implementar sistemas de gestión de calidad. Incluso, en Latinoamérica se ha planteado el Modelo Iberoamericano de Excelencia en la Gestión. Así, muchos países han formulado su propio modelo en busca de facilitar la implementación del TQM.

Sin embargo, aunque existe evidencia empírica de la relación del TQM con el desempeño empresarial, algunos resultados investigativos, parecen indicar que se han presentado fallas en cuanto a la implementación del TQM, lo que ocasiona que no se logren los resultados esperados [9 - 12]. Estas fallas son, en particular, debido a: deficiencias de la dirección al promover la implementación de prácticas para generar un cambio cultural [10]; a barreras de implementación de prácticas asociadas a aspectos humanos y de gestión [11]; a percepciones de los directores muy distantes de lo que en verdad es TQM, que repercute en el diseño de planes inapropiados para su exitosa implementación [12]; entre otras razones.

A pesar de esto, en la literatura persiste un margen considerable de estudios que apoyan la relación entre el uso de prácticas TQM y el desempeño empresarial [13 - 20]. Por tanto, aceptando esta evidencia, esta propuesta de investigación busca promover una mejor comprensión de las prácticas TQM. Lo anterior, considerando que el TQM puede arrojar resultados más favorables cuando se adopta un plan de implementación adecuado [12], fundamentado en el conocimiento claro las fortalezas de la organización y los aspectos que debe mejorar la empresa. A nivel latinoamericano, algunas investigaciones han abordado el estudio del TQM a partir del análisis de sus factores [21 - 23]. Por tanto, sus conclusiones se precisan sobre estos aspectos, dificultando entender cuáles prácticas empresariales están potenciadas en la organización y cuáles merecen mayor atención para lograr una acertada implementación de TQM. En este sentido, es escasa la evidencia sobre trabajos que estudien el nivel de implementación de prácticas TQM en un entorno empresarial latinoamericano.

¹ stan_up@hotmail.com

² daniel.larotta@udea.edu.co

En el caso colombiano, no se han encontrado registros de estudios similares; por tanto, resulta interesante promover investigaciones como esta. Además, este estudio, puede ser provechoso para los Pequeños y Medianos Establecimientos (PYMES) colombianos, que representan un 90,6% del total de los establecimientos industriales, generan un 43% del empleo total del país, aportan 32,6% de la producción bruta y contribuyen con un 27% del valor agregado [24], [25]. En consecuencia, el objetivo de este estudio es identificar las prácticas TQM con mayor y menor nivel de implementación en pequeñas empresas del sector Confección de prendas de vestir de la ciudad de Medellín, Colombia.

2. MÉTODO

Este estudio se desarrolla en dos fases: una cualitativa, en la que se despliega una etapa de revisión de la literatura para adoptar una definición y principios de TQM e identificar las principales prácticas TQM usadas en entornos empresariales. Otra, cuantitativa, donde se realizan dos etapas: la primera, de recolección de información y la segunda, de análisis de resultados para identificar las prácticas TQM con mayor y menor nivel de implementación en las empresas estudiadas. A continuación, se describe el proceso metodológico (Figura 1).

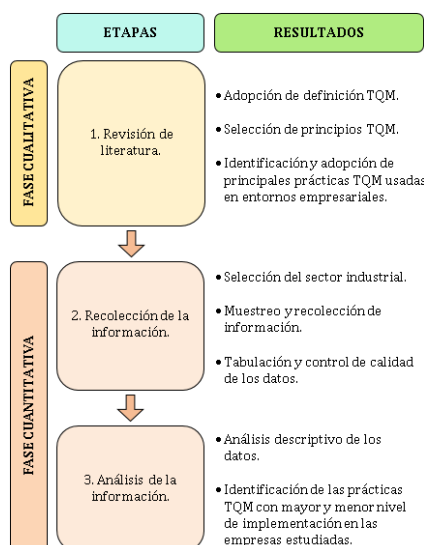


Figura 23. Esquema de desarrollo metodológico

2.1 Revisión de la literatura

Como se ha mencionado antes, en la literatura científica sobre TQM existen diferentes aproximaciones y/o definiciones propuestas a partir de estudios empíricos y/o teóricos. Debido a esta diversidad, es preciso adoptar una definición que permita dar claridad a la conceptualización del TQM y, en concordancia con esta, dar continuidad a las siguientes etapas de la investigación. Considerando lo anterior, se aborda una revisión de literatura que permite identificar una variedad de posturas, pero en particular, una de estas propone entender al TQM como un sistema. En este sentido, se adopta la definición descrita por Hellsten y Klefsjö [3] que, además de haber sido bastante discutida en la literatura, expone al TQM como un sistema de gestión que evoluciona continuamente, compuesto por partes interrelacionadas, con el fin de incrementar la satisfacción de los clientes (internos y externos) con una cantidad mínima de recursos. De esta manera, se reconoce que el TQM está compuesto por *principios*, que son valores o creencias, o preceptos, o conceptos básicos sobre los cuales se construye la cultura de la organización [3], [26] y *prácticas* que son actividades cotidianas apoyadas en técnicas [3], [26] y herramientas [3], para contribuir al cumplimiento de los principios TQM.

Bajo la adopción de este concepto, se consultan en la literatura los posibles principios TQM. Al igual que las definiciones, se encuentran diversas posturas. Por tanto, se adoptan los conceptos fundamentales en los que se basa el Modelo Iberoamericano de Excelencia en la Gestión [27], que facilitan la comprensión de los principios y la contextualización de las prácticas TQM en empresas colombianas. Lo anterior, se debe a que este modelo es más ajustado a las características del contexto latinoamericano. Luego de esta selección, se realiza la identificación de las principales prácticas TQM. Para lograrlo, se localizan y analizan 22 estudios que han medido prácticas TQM a nivel mundial [13] - [17], [20], [28] - [43]. Así mismo se estudian tanto las normas ISO y el modelo de Excelencia EFQM con el objetivo de identificar otros posibles comportamientos a tener en cuenta.

Fruto de dicho análisis, se identifican 53 prácticas TQM que han sido usadas en la literatura para evaluar el concepto o que han sido recomendadas para dicho fin. A partir de ellas, se construye un instrumento de recolección de información que incluye 6 dimensiones que se denominan *Gestión estratégica* (17 prácticas), *Gestión Táctica* (10 prácticas), *Gestión de Empleados* (8 prácticas), *Gestión de Clientes* (6 prácticas), *Gestión de Proveedores* (5 prácticas) y

Gestión de Recursos (7 prácticas)¹. De esta manera, cada una de las prácticas es evaluada a través de una escala de percepción tipo Likert de 5 puntos, donde 1 corresponde a “Muy bajo nivel de implementación de la práctica TQM en la empresa” y 5 a “Muy alto nivel de implementación de la práctica TQM en la empresa”. Así mismo, el instrumento incluye preguntas de identificación como cargo que ocupa el encuestado y antigüedad de la empresa. Igualmente, dado el compromiso del TQM con la satisfacción de los grupos de interés, se incluyen preguntas que abordan esta temática. Finalmente, el instrumento incluye igualmente preguntas asociadas al nivel de compromiso de la empresa con prioridades competitivas como costo, calidad, flexibilidad, etc.

2.2 Recolección de la información

Por tradición, el sector textil de Colombia se ha impulsado principalmente desde la ciudad de Medellín. Sumado a ello, es reconocible que la industrial de la confección ha sido liderada en esta misma ciudad. Por esta razón, se eleva una consulta a la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, órgano oficial de registro mercantil de la actividad económica de las empresas en Colombia, para obtener información sobre las pequeñas empresas pertenecientes al sector confección de prendas de vestir, excepto prendas de piel, de esta misma región. De esta manera, se conoce que, a la fecha de agosto de 2017, existen en total 340 empresas pequeñas en la ciudad, con registro mercantil de este sector. Por tanto, se obtiene aleatoriamente, información de contacto de 150 empresas, que son visitadas, una a una, durante los meses de octubre-noviembre de 2017, para solicitar su participación en el estudio. En estas visitas, se logra administrar el instrumento de recolección de información de forma completa, en 54 empresas que manifiestan su aceptación con la participación en el estudio. Por tanto, se tabula la información recolectada, conformándose una base de datos de 54 observaciones que es revisada, mediante un control de calidad, a fin de corregir errores de digitación y comprobar que no aparezcan datos faltantes.

2.3 Análisis de la información

Una vez obtenida la tabulación de los datos, se realiza, en primer lugar, un análisis descriptivo para ofrecer una presentación general de la muestra en términos del perfil de las empresas visitadas. Además, se detallan las respuestas a las preguntas que indagan sobre la satisfacción de los grupos de interés y aquellas asociadas al nivel de compromiso de la empresa con algunas prioridades competitivas. Posteriormente, se identifican las prácticas TQM con mayor y menor nivel de implementación en las empresas del estudio. De esta manera, se determinan los resultados la investigación que se exponen en la sección contigua de Resultados. Los cálculos y gráficas presentados en el estudio, se llevan a cabo con el uso del software IBM® SPSS® Statistics Versión 24.

3. RESULTADOS

3.1 Perfil de las empresas

El análisis descriptivo de los datos, muestra que aproximadamente un tercio del total de los encuestados (33,33%) pertenece al nivel directivo en las empresas visitadas. El restante 66,67% la conforman profesionales que, previamente han sido delegados por la empresa de manera oficial, para responder al instrumento de recolección de información. Además, en la Figura 2, se observa que la mayor proporción de las encuestas logradas, se obtienen de parte de empresas que se encuentran en una edad media, según la clasificación de la Confederación Colombiana de Cámaras de Comercio [44]. Esto podría sugerir que estas pequeñas empresas, posiblemente han adquirido alguna experiencia en la implementación de prácticas de gestión empresarial y con esto, presentan mayor acogida de la filosofía TQM.

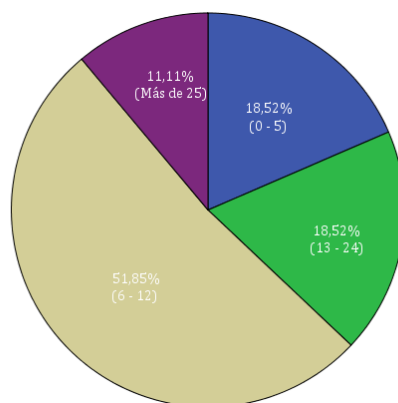


Figura 24. Antigüedad de las empresas (años)

¹ El instrumento de recolección de información en mención, así como su proceso de construcción hace parte de otra publicación desarrollada por los autores de este trabajo. Dicho escrito se encuentra actualmente en otro proceso de evaluación, por tanto, no es permitido brindar mayores detalles al respecto.

3.2 Percepción de los encuestados frente a la posible satisfacción de los grupos de interés

Siguiendo la definición adoptada en este estudio, el TQM tiene como propósito incrementar la satisfacción de los grupos de interés [3]. De acuerdo con esto, se analizan las respuestas sobre el nivel de satisfacción de clientes, empleados, proveedores y propietarios. Estas preguntas, son calificadas en el instrumento con puntuaciones de 1 a 5, donde 1 corresponde al más bajo nivel de percepción sobre la satisfacción de cada grupo y 5 al más alto nivel. De esta manera, la Tabla 1 muestra los porcentajes de las puntuaciones asignadas.

Tabla 24. Percepción sobre el nivel general de satisfacción de los grupos de interés con la empresa

Calificación	Clientes	Empleados	Proveedores	Propietarios
1	0%	1,85%	0%	1,85%
2	1,85%	1,85%	0%	3,70%
3	3,70%	14,81%	11,11%	20,37%
4	61,11%	53,70%	48,15%	57,41%
5	33,33%	27,78%	40,74%	16,67%

Al respecto, un primer acercamiento permite observar que, en general, los encuestados perciben que estos grupos de interés se encuentran en un considerable nivel de satisfacción con la empresa. La mayor parte de estas respuestas se califican con puntuación de 4 y, en particular, los clientes son quienes tienen el más alto porcentaje en este nivel. Además, es de notar que, en el caso de los proveedores las puntuaciones asignadas únicamente van desde 3 hasta 5, a diferencia de los demás. Lo anterior, puede sugerir que tanto los clientes como los proveedores son las partes que posiblemente se encuentran mejor satisfechas con la empresa. De otra parte, al realizar un segundo acercamiento a estos resultados, se encuentra que tanto los empleados como los propietarios, presentan los mayores porcentajes de puntuaciones entre 1 y 2, en comparación con el resto.

Esto puede indicar que, una porción de los entrevistados percibe que, ambos grupos posiblemente no se encuentran completamente satisfechas con la empresa. Por tanto, puede ser útil para los directores, indagar las posibles inconformidades de estas partes para formular e implementar mejoras internas en la organización. En términos generales, este hallazgo muestra que, en las pequeñas empresas visitadas, los clientes externos (clientes y proveedores) parecen estar mejor satisfechos con la empresa que los clientes internos (empleados y propietarios). Los empresarios, pueden utilizar estos resultados para el fortalecimiento de las prácticas TQM orientadas a estos grupos de interés, de manera que obtengan mejor aprovechamiento de las ventajas de contar con clientes externos satisfechos y apunten a superar aquellas inconformidades de sus clientes internos.

3.3 Descripción del nivel de compromiso de la empresa con algunas prioridades competitivas

La definición adoptada en esta investigación, también afirma que el TQM hace uso racional de los recursos para alcanzar los resultados [3]. En este sentido, la implementación de prácticas TQM puede contribuir a la administración operativa de los recursos y reflejar así resultados, no solo a nivel financiero sino en aspectos competitivos. Estos últimos, general valor a los clientes y, por tanto, inciden en su satisfacción. Por esta razón, cobra importancia analizar en las empresas estudiadas el compromiso con la satisfacción del cliente ante algunos atributos competitivos como la *calidad* de los bienes y/o servicios, los *costos* asociados a los productos, el *tiempo de entrega* prometido al cliente, la *velocidad de fabricación* y la capacidad de adaptación a las distintas solicitudes – *flexibilidad*. Para llevar a cabo este análisis, se obtienen puntuaciones sobre la prioridad de cada uno de los anteriores elementos, calificando desde 1, el aspecto más importante hasta 5, el menos importante para la satisfacción de los clientes. De esta manera, la Tabla 2 muestra los valores resultantes, donde se distingue la prioridad de cada aspecto.

Tabla 25. Percepción de prioridad para la satisfacción del cliente frente a aspectos competitivos

	Satisfacción con los costos	Satisfacción con la calidad	Satisfacción con el tiempo de entrega	Satisfacción con la velocidad de fabricación	Satisfacción con la flexibilidad
Suma	143	106	154	198	209
Moda (Prioridad)	2	1	3	4	5
Frecuencia calificación 1	12	25	8	1	8
Frecuencia calificación 2	20	14	10	6	4
Frecuencia calificación 3	5	11	22	13	3
Frecuencia calificación 4	9	0	10	24	11
Frecuencia calificación 5	8	4	4	10	28

Según los datos, parece que, en estas empresas, se prioriza la satisfacción del cliente con la *calidad* y el *costo*. Lo anterior, posiblemente se deba a las políticas internas tanto del sector como de las empresas, en cuanto a la fabricación

de prendas de vestir de alta calidad a un bajo costo, para poder ser competitivos y mantenerse en el mercado. Más allá de ser así, se puede potenciar también la satisfacción del cliente con estos dos aspectos competitivos, a partir de la implementación de prácticas TQM. Las pequeñas empresas aquí analizadas pueden considerar un plan de acción donde fortalezcan actividades para: 1) conocer con claridad los requisitos del cliente, y con base en estos, 2) precisar las especificaciones de los suministros a los proveedores, 3) fabricar productos/servicios, 4) evaluar tanto los resultados organizacionales como la satisfacción del cliente, y finalmente, 5) generar ventajas competitivas a partir de estos resultados. De esta manera, pueden abordar al TQM como un sistema [3], involucrando a todas las personas, mejorando los resultados y manteniendo satisfechos no solo a los clientes, sino a otras partes interesadas.

Por otro lado, parece que en general estas empresas asignan una menor prioridad a la satisfacción del cliente con la *flexibilidad* y la *velocidad de fabricación*. Probablemente, debido al tamaño pequeño de estas organizaciones, que limita sus capacidades, se dificulte en ellas tanto la adaptación a las solicitudes del cliente, como la elaboración oportuna de los pedidos. De ser así, sus empresarios pueden encontrar una alternativa de solución mediante la implementación de prácticas TQM. Estas pequeñas empresas pueden fortalecer aquellas acciones orientadas a la: 1) programación de actividades de forma periódica para todas las unidades, 2) evaluación del cumplimiento de las actividades programadas y 3) respuesta rápida y oportuna a las diferentes necesidades del cliente. Adoptando estas prácticas, posiblemente también se facilite la formulación de estrategias tácticas y operativas para la mejora de los procesos, que apunte al cumplimiento eficaz y eficiente de los requisitos de los clientes.

3.4 Determinación del nivel de implementación de prácticas TQM

Para abordar el propósito de este estudio, se realiza un procedimiento de cuantificación y categorización del nivel de implementación de las prácticas TQM. Este procedimiento se ejecuta con base en un modelo propuesto para la cuantificación del nivel de excelencia de los agentes facilitadores EFQM [45]. Para ello, se describen a continuación algunas propiedades, los indicadores y la categorización.

- *Autoevaluación:* El levantamiento de los datos, se originó mediante un instrumento de recolección de información auto-administrado. De manera que, las personas que participaron tuvieron la posibilidad de responder de manera autónoma, sin el sesgo del encuestador, respondiendo sobre su percepción ante las diferentes preguntas y prácticas con una calificación con escala Likert de cinco puntos.
- *Modelación:* El nivel de implementación de las prácticas TQM se cuantifica de forma global, es decir, interpretando en su conjunto, todas las percepciones obtenidas de las empresas visitadas. Por tanto, los análisis y los resultados se precisan de forma general.
- *Formulación:* La formulación del procedimiento de cuantificación se basa en los parámetros e indicadores:

CP_{ij} : Calificación de las prácticas TQM asignada por el encuestado, de acuerdo con la escala Likert utilizada, desde $i = 1, \dots, n$ y $j = 1, \dots, m$. Esta puntuación corresponde a valores escalares entre 1 y 5 en las $n = 54$ observaciones, para las $m = 53$ prácticas.

IP_j : Importancia relativa de la práctica j , que consiste en una ponderación asignada a cada una de las prácticas TQM. En la definición adoptada, se afirma que el TQM es un sistema de elementos interrelacionados con el mismo objetivo [3]. Por tanto, se considera que las 53 prácticas cobran igual importancia y, en consecuencia, se asigna igual peso para cada una de ellas ($1/53 \approx 0,0189$).

PP_j : Puntaje cuantificado del nivel de implementación de cada práctica j . Se obtiene mediante la ecuación (1).

$$PP_j = \sum_{i=1}^n CP_i \times IP_j; \forall j \quad (1)$$

Observe que (1) es la suma ponderada entre la calificación de cada una de las prácticas y su importancia relativa para la adopción del TQM como un sistema.

pIP_j : Porcentaje aproximado de implementación de cada práctica j . Se obtiene mediante la ecuación (2).

$$pIP_j = \frac{PP_j}{PP_{max}} \times 100; \forall j \quad (2)$$

Dada la escala Likert utilizada para calificar el nivel de implementación de las prácticas TQM, PP_{max} corresponde a un valor de 5.

- *Categorización:* Para categorizar el nivel de implementación de las prácticas TQM, se proponen cinco regiones: "Muy bajo", "Bajo", "Medio", "Alto", "Muy alto", con rangos de la misma amplitud (0,8), como se muestra en la Tabla 3. De esta manera, las puntuaciones obtenidas para cada práctica, se ubicarán en cualquiera de estas regiones, posibilitando la identificación del nivel de implementación asociado a cada una de ellas.

Tabla 26. Categorías para el nivel de implementación de las prácticas TQM

Categoría	Niveles de implementación				
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Puntaje	1 - 1,8	1,8 - 2,6	2,6 - 3,4	3,4 - 4,2	4,2 - 5
Porcentaje	20% - 36%	36% - 52%	52% - 68%	68% - 84%	84% - 100%

- **Cuantificación:** Los cálculos indicados en las ecuaciones (1) y (2), se realizan para el conjunto de 53 prácticas TQM y las 54 observaciones obtenidas de las empresas, considerando los parámetros previos. Posteriormente, se jerarquizan las puntuaciones y porcentajes obtenidos ubicándose en cada rango de nivel de implementación, de acuerdo a lo descrito en la Tabla 3.
- **Construcción del gráfico:** Se construye un gráfico de dispersión para el puntaje cuantificado (PP) del nivel de implementación de las 53 prácticas TQM. De este modo, aquellas prácticas con puntajes superiores a 4,2 (84% de implementación) son consideradas con mayor nivel de implementación, puesto que caen dentro de la categoría “Muy alto”. Por lo tanto, como se observa en la Figura 3, un total de 11 prácticas TQM se encuentran en esta región.

De igual manera, aquellas prácticas con puntajes inferiores a 3,4 (68% de implementación) son consideradas con menor nivel de implementación, debido a que pueden caer en categorías “Medio”, “Bajo” y “Muy bajo”. Por lo anterior, 4 prácticas se encuentran bajo una única región (“Medio”) (Figura 3). Este resultado parece indicar que la mayor dificultad en las empresas del estudio, la presentan en la implementación de cuatro prácticas en específico. Sin embargo, se decide identificar también las 11 prácticas TQM con las más bajas puntuaciones de nivel de implementación. En este sentido, se señalan las siguientes 7 prácticas con los puntajes más bajos con un punto gris, como se observa en la Figura 3. Cabe resaltar que estas prácticas conforman igualmente aspectos en los que las empresas del estudio deberían mejorar. De este modo, se presentan las 11 prácticas TQM con mayor nivel de implementación y las 11 prácticas TQM con menor nivel de implementación para las empresas visitadas.

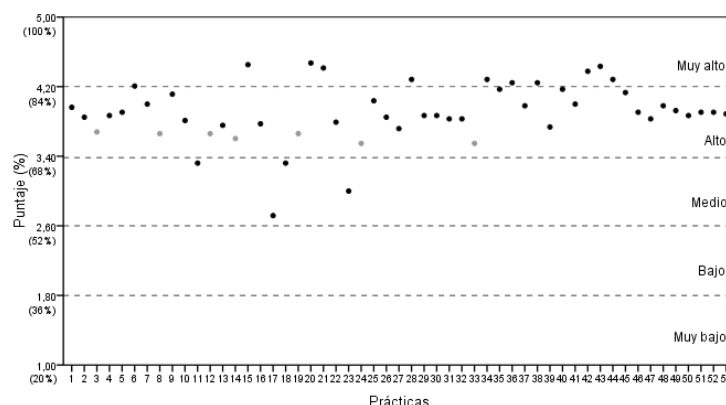


Figura 25. Puntaje asociado al nivel de implementación de las prácticas TQM

- **Interpretación:** El proceso de interpretación se orienta a la descripción del conjunto de prácticas con mayor y menor nivel de implementación. Este análisis, se realiza teniendo en cuenta las dimensiones del TQM en a las que se orientan las 53 prácticas, la definición de TQM adoptada, los principios TQM, los resultados de percepción sobre el nivel de satisfacción de los grupos de interés y la descripción del nivel de compromiso de la empresa con algunas prioridades competitivas.
- **Prácticas con mayor nivel de implementación:** En la Tabla 4, se describen las prácticas TQM con mayor nivel de implementación, las cuales, hacen referencia a la *Gestión Estratégica* (prácticas: 6, 9 y 15), la *Gestión Táctica* (prácticas 20 y 21), la *Gestión de Empleados* (prácticas 28 y 34), la *Gestión de Clientes* (prácticas 36 y 38) y la *Gestión de Proveedores* (prácticas 42, 43 y 44). Estas prácticas se encuentran aproximadamente entre un 82% y un 87% de implementación, demostrando que, al parecer, las empresas están haciendo un esfuerzo por desarrollar productos diferenciadores, generar valor agregado a la oferta de productos para sus clientes y orientarse hacia el logro de los objetivos del negocio, a través del esfuerzo de todos los miembros, mientras cumplen con los parámetros regulados por el gobierno local.

De acuerdo a la definición adoptada en este estudio, el objetivo del TQM es satisfacer a las partes interesadas [3]. Por tanto, resulta interesante observar si dentro de las prácticas TQM con mayor nivel de implementación se ven reflejados a los grupos de interés de las empresas de estudio. De esta forma, de acuerdo a los resultados señalados en la Tabla 4 y teniendo en cuenta su redacción, las prácticas 20, 21, 36 y 38, reflejan la orientación hacia los clientes; las prácticas 42, 43 y 44, se alinean hacia los proveedores; las prácticas 28 y 34, sugieren un enfoque hacia los empleados; y las prácticas 6 y 25 consideran a los directivos y al gobierno. Esto parece indicar que, por la cantidad de prácticas resultantes, estas empresas hacen mayor énfasis en la orientación hacia los clientes externos

(clientes y proveedores); mientras que los empleados, accionistas y el gobierno, pudieran requerir más atención. Lo anterior, guarda semejanza con lo señalado en la sección 3.2, donde se expone que los clientes y proveedores parecen estar mejor satisfechos con la empresa que los empleados y propietarios. Lo adicional a esto, es que puede ser provechoso para estas pequeñas empresas, preocuparse más en involucrar otras partes interesadas como el gobierno, adoptando prácticas TQM para este fin.

Tabla 27. Prácticas TQM con mayor nivel de implementación en las empresas del estudio

Práctica	Puntuación	Porcentaje	Descripción
20	4,47	87,78%	Desarrollar productos y servicios de acuerdo con las necesidades y expectativas del cliente.
15	4,45	87,41%	Cumplir las normativas y regulaciones definidas por el gobierno (y sus entidades gubernamentales).
43	4,43	87,04%	Informar con claridad a los proveedores las especificaciones de los suministros requeridos.
21	4,42	86,67%	Innovar en producto, es decir, se ofrecen al cliente productos nuevos o mejorados de acuerdo con sus necesidades.
42	4,38	85,93%	Seleccionar a los proveedores basándose en la calidad de sus productos/servicios.
28	4,28	84,07%	Contratar empleados de acuerdo con las necesidades de la organización.
34	4,28	84,07%	Asegurar a los empleados un entorno seguro y saludable preservando el bienestar laboral.
44	4,28	84,07%	Fomentar el fortalecimiento de las relaciones a largo plazo con los proveedores.
36	4,25	83,33%	Diseñar políticas orientadas a la satisfacción del cliente.
38	4,25	83,33%	Fomentar el fortalecimiento de relaciones a largo plazo con los clientes.
6	4,21	82,59%	Asegurar que los directivos estén comprometidos con la política de calidad.

Adicionalmente, sobre las prácticas con mayor nivel de implementación orientadas al cliente, las pequeñas empresas pueden aprovechar estos potenciales y adoptar planes de mejora para fortalecer la estrecha relación con este grupo de interés. Como se ha descrito en la sección 3.3, estas empresas podrían asegurarse de satisfacer a sus clientes con aspectos competitivos como la *calidad* y el *costo*, adoptando el plan de acción sugerido. Es notable que, en las empresas que acojan un plan de acción similar al propuesto, este ejercicio se facilitará aún más, pues dentro de las acciones sugeridas, dos de ellas se encuentran cubiertas por algunas prácticas con mayor nivel de implementación.

La segunda acción “2) precisar las especificaciones de los suministros de los proveedores”, puede ser desplegada por la práctica 43 que se encuentra, aproximadamente, a nivel general en un 87,04% de implementación; mientras que la tercera “3) fabricar productos/servicios” puede operarse mediante las prácticas 20 y 21 que, a su vez, promueven la innovación y están de manera global, aproximadamente en un 87,78% y 86,67% de implementación en las empresas estudiadas, respectivamente. De otra parte, posiblemente se requiera un mayor esfuerzo de estas empresas para potenciar la satisfacción del cliente con aspectos competitivos como la *flexibilidad* y la *velocidad de fabricación*, de acuerdo a lo sugerido. En los resultados, ninguna de las prácticas TQM con mayor nivel de implementación parecen estar asociadas a las acciones propuestas para lograr este fin. Por consiguiente, esta situación puede convertirse en una oportunidad de mejora en estas empresas.

En general, estas prácticas con mayor nivel de implementación en las empresas encuestadas, permiten en su mayoría el despliegue del principio TQM *Liderar con visión, inspiración e integridad*, que se describe en el Modelo Iberoamericano de Excelencia en la Gestión [27]. Es evidente que este hallazgo guarda relación con la realidad de las pequeñas empresas colombianas, pues sus directores asumen un mayor compromiso liderando las actividades diarias para la obtención de resultados satisfactorios. Esto ocurre porque quienes las dirigen resultar ser, en la mayoría de los casos, sus mismos propietarios.

- **Prácticas con menor nivel de implementación:** En contraste con lo anterior, en la Tabla 5, se describen las prácticas con menor nivel de implementación, que se refieren a la *Gestión Estratégica* (prácticas 3, 8, 11, 12, 14 y 17), la *Gestión Táctica* (prácticas 18, 19, 23 y 24) y la *Gestión de Empleados* (práctica 33). Estas prácticas se encuentran, aproximadamente, entre un 53% y un 72% de implementación, indicando que, las pequeñas empresas analizadas requieren mayor atención en aspectos asociados, principalmente, con elementos de gestión que apuntan hacia la estrategia y la planeación de actividades; hacia la deficiencia en la medición, coordinación y prevención del riesgo en procesos operativos; y hacia la evaluación de la satisfacción de empleados. Sobre esto, es preciso resaltar que las prácticas que podrían requerir prioridad, por encontrarse en un nivel “Medio” de implementación, se refieren a la cooperación con otras entidades del entorno de la empresa (práctica 17) y a aspectos operativos como: el ejercicio de la medición usando técnicas cuantitativas para el análisis de la información, la programación de actividades por áreas y la evaluación de los resultados (prácticas 23, 18 y 11 respectivamente).

Todo lo anterior, posiblemente se deba a que, por el tamaño de las empresas, estas prefieren orientar sus esfuerzos en mantener la rentabilidad del negocio, descuidando los beneficios que se pueden adquirir por medio de alianzas con otros actores de su entorno. Así también, es muy probable que el personal desconozca la utilidad de los indicadores y/o las técnicas cuantitativas para apoyar la medición de los resultados y la toma de decisiones. Esto

podría ser generado, por el hecho de que las responsabilidades de las diferentes áreas de estas empresas, en muchos casos, recaen sobre las mismas personas, dificultando la comprensión del propósito holístico de estas prácticas TQM.

Tabla 28. Prácticas TQM con menor nivel de implementación en las empresas del estudio

Práctica	Puntuación	Porcentaje	Descripción
17	2,72	53,33%	Generar alianzas con universidades, entidades gubernamentales, gremios u otros con el fin de contribuir al mejoramiento de las prácticas productivas y las características del producto ofrecidos por la empresa.
23	3,00	58,89%	Usar herramientas cuantitativas (por ejemplo: análisis de varianza, histogramas de frecuencia, gráficos estadísticos, etc.) para tomar decisiones que permitan introducir mejoras en la calidad.
18	3,32	65,19%	Establecer la programación de actividades para sus departamentos, divisiones o unidades organizacionales de forma periódica.
11	3,32	65,19%	Evaluar a través de indicadores la evolución de los resultados obtenidos (indicadores financieros, de calidad, de productividad, etc.)
33	3,55	69,63%	Evaluar la satisfacción de los empleados con su propio trabajo.
24	3,55	69,63%	Coordinar de manera integral los procesos ejecutados en toda la organización.
14	3,60	70,74%	Repartir utilidades sin comprometer el funcionamiento de la misma.
19	3,66	71,85%	Evaluar el cumplimiento de las actividades programadas o los planes generados.
12	3,66	71,85%	Tener una cultura de la prevención del riesgo.
8	3,66	71,85%	Documentar los procesos con el fin de tener clara y estandarizada la mejor manera de ejecutar las actividades.
3	3,68	72,22%	Diseñar planes de mejora para todas las actividades realizadas al interior de la organización.

Además de lo anterior, también cobra importancia observar cuáles de las 11 prácticas TQM con menor nivel de implementación, pueden indicar qué aspectos requieren mayor atención en torno a los grupos de interés de las empresas de estudio. En este sentido, los resultados parecen mostrar un hecho paradójico: si bien existe mayor énfasis en generar un ambiente adecuado para las personas, la práctica 33 (aproximadamente implementada en un 69,63%), indica que la medición de la satisfacción de los empleados, requiere mayor cuidado. En este punto, es importante señalar que, aunque parece que todos los grupos de interés se encuentran en un nivel considerable de satisfacción con la empresa (ver sección 3.2), en la práctica, posiblemente se debe mejorar la atención de los empleados.

Tal como se expuso anteriormente, puede ser que los empleados no se encuentren completamente satisfechos y esto se debe a que el ejercicio de indagar por las inconformidades, demanda mayor compromiso de la dirección. Además, este hallazgo puede sugerir que, existe un aspecto del ciclo PHVA susceptible de mejora: la verificación; que es un ejercicio que se concreta, en este caso, con la medición de la satisfacción de este grupo de interés. No basta con generar buen ambiente, sino que se debe comprobar que en verdad se logre un efecto positivo sobre los sujetos a quienes se involucran. Sumado a esto, la práctica 17 muestra que a pesar de que las empresas del estudio hacen esfuerzos por cumplir con la normatividad del gobierno, deben prestar atención a la generación de alianzas con otros organismos. Esto reafirma la necesidad de aumentar la integración de otras partes interesadas a los propósitos organizacionales.

Por otro lado, las prácticas con menor nivel de implementación también pueden sugerir aspectos de mejora para la satisfacción de los clientes con criterios competitivos como la *calidad* y el *costo*. Si bien, en la sección 3.3 se expone la prioridad asignada a estos dos componentes, el plan de acción sugerido para potenciar la satisfacción del cliente puede verse afectado en aquellas empresas analizadas que lo adopten, por causa de algunas prácticas con menor nivel de implementación. La actividad propuesta en la anterior sección como “4) evaluar tanto los resultados organizacionales como la satisfacción del cliente”, puede verse afectada por la práctica 11, implementada de manera general en un 65,18%, puesto que concierne al uso de indicadores para medir los resultados. Este puede ser un punto de partida para incluir mejoras en la gestión operativa de las pequeñas empresas encuestadas, que aportaría también a la toma de decisiones.

Adicionalmente, el plan de acción propuesto para mejorar la satisfacción del cliente con aspectos competitivos como la *flexibilidad* y la *velocidad de fabricación*, puede verse perjudicado por algunas prácticas con menor nivel de implementación en las empresas del estudio que decidan adoptarlo. La acción propuesta como “1) programación de actividades de forma periódica para todas las unidades”, puede verse afectada por la práctica 18, que se encuentra aproximadamente en un 65,18% de implementación de forma general en estas empresas. Esta se refiere al establecimiento de un programa de actividades periódico para todas las partes administrativas que conforman la unidad de negocio. Así también, la acción propuesta como “2) evaluación del cumplimiento de las actividades programadas”, posiblemente se ve influenciada por la práctica 19, que se encuentra aproximadamente en un 71,85% de implementación de manera global en las empresas estudiadas. Esta última, se

refiere a la evaluación del cumplimiento de las actividades programadas. En consecuencia, una oportunidad de mejora en las empresas estudiadas la constituye el establecimiento y seguimiento de un plan de actividades periódico, para así potenciar su rendimiento operativo.

De manera general, estas prácticas con menor nivel de implementación, parecen enfocarse, en su mayoría, al principio TQM Gestión por procesos, descrito en el Modelo Iberoamericano de Excelencia en la Gestión [27]. Por tanto, puede afirmarse que, en general, estas empresas requieren mejorar la efectividad de sus operaciones, a partir de la medición, para que así logren comprender sus procesos y puedan ser gestionadas de forma sistémica.

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se determinan las prácticas TQM con mayor y menor nivel de implementación en pequeñas empresas del sector Confección de prendas de vestir, de Medellín – Colombia, con base en una investigación exploratoria de metodología mixta secuencial. Esta metodología consta de dos etapas, una cualitativa que logra identificar una definición, unos principios y un conjunto concreto de prácticas TQM. Posteriormente, se ejecuta una etapa cuantitativa, donde se ejecuta una conversión de la escala de percepción, para cuantificar y categorizar las opiniones de los encuestados. De esta manera, se ofrecen resultados reproducibles.

Específicamente, en este estudio se identifican 11 prácticas TQM potenciadas y otras 11 prácticas TQM susceptibles de mejora en estas unidades de negocio. Las primeras, se encuentran en un alto nivel de implementación y, principalmente, se alinean al desarrollo de productos diferenciadores y a partes interesadas como los clientes y proveedores. En particular, se orientan a dimensiones del TQM como la *Gestión Estratégica*, la *Gestión Táctica*, la *Gestión de Empleados*, la *Gestión de Clientes* y la *Gestión de Proveedores*. Por lo tanto, las empresas participantes en este estudio, aunque no posean un compromiso explícito con la adopción de un modelo TQM, se encuentran ejecutando actividades en su día a día, que podrían ser útiles en la adopción de la filosofía TQM. El aprovechamiento de estas por los empresarios, puede contribuir al fortalecimiento de las relaciones con los clientes, para potenciar aspectos competitivos como la *calidad* y el *costo* de sus productos y/o servicios.

El segundo grupo de 11 prácticas, se encuentran en niveles de implementación inferiores y, en particular, se refiere a aspectos de la gestión operativa de las empresas, a la satisfacción de los empleados y la generación de alianzas. Más específicamente, estas prácticas se encuentran orientadas a dimensiones del TQM como la *Gestión Estratégica*, la *Gestión Táctica* y la *Gestión de Empleados*. De esto, puede inferirse que para un compromiso más concreto con la filosofía TQM, estas empresas deberán asumir la implementación eficaz de estas prácticas, para fortalecer su estrategia y su operación. Adicionalmente, estas prácticas con menor nivel de implementación, pueden sugerir aspectos de mejora en las pequeñas empresas estudiadas, específicamente, en lo relacionado con el uso de herramientas cuantitativas como instrumentos de diagnóstico, la programación periódica de actividades, la evaluación de los resultados, el conocimiento claro de las necesidades del personal y la asociación favorable con otros actores del entorno. Todos estos, pueden convertirse en elementos de mayor atención para evitar que se afecte la satisfacción del cliente con criterios competitivos como la *flexibilidad* y la *velocidad de fabricación* de productos. Así mismo, todas estas prácticas, pueden constituirse en elementos puntuales para el fortalecimiento de la estrategia que, basada en un plan de implementación de la filosofía del TQM y teniendo claridad en la distribución de los recursos, facilite a estas pequeñas empresas alcanzar sus objetivos, mientras satisfacen a los diversos grupos de interés.

Aunque los resultados descritos en este estudio, se ofrecen de manera generalizada para las empresas estudiadas, los empresarios interesados en implementar mejoras pueden evaluar de forma interna las prácticas TQM con mayor y menor nivel de implementación. De esta manera, posibilitan la obtención de sus propios análisis, mediante la cuantificación y categorización de sus percepciones que, incluso, puede considerar, también, la participación de todos los miembros de la organización. Adicionalmente, una observación por áreas administrativas igualmente puede facilitar la identificación de aspectos de mejora. Todo este ejercicio les puede facilitar el análisis del progreso de su empresa, tomando medidas en diferentes periodos y comparando los resultados obtenidos. En este sentido, podrán contar con evidencia para el direccionamiento estratégico, táctico y operativo de la organización, potenciando sus fortalezas para superar las barreras o amenazas y así registrar rendimientos significativos. Además, al reconocer sus grupos de interés específicos, los directores de estas pequeñas empresas, pueden consultar con mayor precisión el nivel de satisfacción de estos y medir con mayor exactitud el establecimiento de alianzas y la participación conjunta con el gobierno local, entre otros aspectos.

Finalmente, los resultados de este estudio deben ser interpretados a la luz de sus posibles limitaciones. Una de ellas se refiere al tamaño de la muestra que hace que se generen conclusiones únicamente sobre la muestra estudiada. Además, los resultados pueden verse limitados por haberse obtenido a partir de la percepción del encuestado. Por esta razón, se sugiere que los futuros estudios, amplíen la toma de observaciones y utilicen otros enfoques de medición para obtener datos e información más precisa, incluyendo también percepciones de otras partes interesadas.

REFERENCIAS

- [1] L. M. Tobin, "The new quality landscape: total quality management", *Journal of Systems Management*, vol. 19, no. 3, pp. 510-536, 1990.
- [2] R. R. Lakhe and R. P. Mohanty. "Total quality management: concepts, evolution and acceptability in developing economies", *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 11, no. 9, pp. 9-33, 1994.
- [3] U. Hellsten and B. Klefsjö, "TQM as a management system consisting of values, techniques and tools", *The TQM magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 238-244, 2000.
- [4] S. Mehra and S. P. Agrawal, "Total quality as a new global competitive strategy", *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 20, no. 9, pp. 1009-1025, 2003.
- [5] B. O. Ehigie and E. B. McAndrew, "Innovation, diffusion and adoption of total quality management (TQM)", *Management Decision*, vol. 43, no. 6, pp. 925-940, 2005.
- [6] P. M. Charantimath, *Total quality management*. 2nd. ed. New Delhi: Person Education, 2011, p. 59.
- [7] B. Janakiraman and R. Gopal. *Total quality management: Text and cases*. 1sr. ed. New Delhi: PHI Pvt. Ltd.1, 2006, p. 58.
- [8] G. Kanji, *Total quality management: proceedings of the first world congress*. 1st. ed. Sheffield (UK): Springer Science & Business Media, 2012, p. 548.
- [9] P. Burrows, "TQM reality check: it works, but it's not cheap or easy", *Electronic Business*, vol. 18, no. 1, pp. 47-54, 1992.
- [10] M. Beer, "Why total quality management programs do not persist: the role of management quality and implications for leading a TQM transformation", *Decision Sciences*, vol. 34, no. 4, pp. 623-642, 2003.
- [11] T. T. Yamada, C. F. Poltronieri, L. N. Gambi, and M. C. Gerolamo, "Why does the implementation of quality management practices fail? A qualitative study of barriers in Brazilian companies", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 81, pp. 366-370, 2013.
- [12] A. M. Mosadeghrad, "Why TQM programmes fail? A pathology approach", *The TQM Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 160-187, 2014.
- [13] J. V. Saraph, P. G. Benson, and R. G. Schroeder, "An instrument for measuring the critical factors of quality management", *Decision Sciences*, vol. 20, no. 4, pp. 810-829, 1989.
- [14] S. A. Black and L. J. Porter, "Identification of the critical factors of TQM", *Decision Sciences*, vol. 27, no. 1, pp. 1-21, 1996.
- [15] D. Samson and M. Terziovski, "The relationship between total quality management practices and operational performance", *Journal of operations management*, vol. 17, no. 4, pp. 393-409, 1999.
- [16] J. Antony, K. Leung, G. Knowles, and S. Gosh, "Critical success factors of TQM implementation in Hong Kong industries", *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 19, no. 5, pp. 551-566, 2002.
- [17] H. Kaynak, "The relationship between total quality management practices and their effects on firm performance", *Journal of operations management*, vol. 21, no. 4, pp. 405-435, 2003.
- [18] S. Ismail, "Critical success factors for TQM implementation and their impact on performance of SMEs", *International journal of productivity and performance management*, vol. 58, no. 3, pp. 215-237, 2009.
- [19] A. R. Sahu, R. R. Shrivastava, and R. L. Shrivastava, "Development and validation of an instrument for measuring critical success factors (CSFs) of technical education—a TQM approach", *International Journal of Productivity and Quality Management*, vol. 11, no. 1, pp. 29-56, 2013.
- [20] D. P. Kafetzopoulos, and K. D. Gotzamani, "Critical factors, food quality management and organizational performance", *Food Control*, vol. 40, pp. 1-11, 2014.
- [21] J. Rositas, "Factores Críticos de Éxito en la Gestión de Calidad Total en la industria manufacturera Mexicana", *Ciencia UANL*, vol. 12, no. 2, pp. 181-193, 2009.
- [22] J. B. Benzaquen, "Calidad en las empresas latinoamericanas: El caso peruano", *Globalización, Competitividad y Gobernabilidad de Georgetown/Universia*, vol. 7, no. 1, pp. 41-59, 2013.
- [23] A. Bello, R. Kaufmann, and J. Merino, "Advanced manufacturing technologies, quality management practices, and manufacturing performance in the southern cone of Latin America", *Management Research: The Journal of the Iberoamerican Academy of Management*, vol. 13, no. 2, pp. 187-210, 2015.
- [24] F. M. Ricaurte, "Caso colombiano de las Pymes y su incidencia en la economía", *Revista Estrategia Organizacional*, vol. 1, no. 1, pp. 19-24, 2015.
- [25] Revista Dinero. (2016, Sep 15). Pymes contribuyen con más del 80% del empleo en Colombia [Online]. Available: <https://www.dinero.com/edicion-impresa/caratula/articulo/porcentaje-y-contribucion-de-las-pymes-en-colombia/231854>.
- [26] J. W. Dean Jr and D. E. Bowen, "Management theory and total quality: improving research and practice through theory development", *Academy of management review*, vol. 19, no. 3, pp. 392-418, 1994.
- [27] Fundación Iberoamericana para la Gestión de la Calidad – FUNDIBEQ. (2015). Modelo Iberoamericano de Excelencia en la Gestión [Online]. Available: <http://www.fundibeq.es/modelo-excelencia>.
- [28] J. Zeng, C. A. Phan, and Y. Matsui, "The impact of hard and soft quality management on quality and innovation performance: An empirical study", *International journal of production economics*, vol. 162, pp. 216-226, 2015.
- [29] J. C. Anderson, M. Rungtusanatham, R. G. Schroeder, and S. Devaraj, "A path analytic model of a theory of quality management underlying the Deming management method: preliminary empirical findings", *Decision sciences*, vol. 26, no. 5, pp. 637-658, 1995.
- [30] A. Calvo, A. Picón, C. Ruiz, and L. Cauzo, "The relationships between soft-hard TQM factors and key business results", *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 34, no. 1, pp. 115-143, 2013.
- [31] T. Y. Choi and K. Eboch, "The TQM paradox: relations among TQM practices, plant performance, and customer satisfaction", *Journal of Operations management*, vol. 17, no. 1, pp. 59-75, 1998.
- [32] K. O. Cua, K. E. McKone, and R. G. Schroeder, "Relationships between implementation of TQM, JIT, and TPM and manufacturing performance", *Journal of operations management*, vol. 19, no. 6, pp. 675-694, 2001.
- [33] D. Gadenne and B. Sharma, "An investigation of the hard and soft quality management factors of Australian SMEs and their association with firm performance"; *Inter. Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 26, no. 9, pp. 865-880, 2009.
- [34] TC. Powell, "Total quality management as competitive advantage: a review and empirical study", *Strategic management journal*, vol. 16, no. 1, pp. 15-37, 1995.

- [35] S. U. Rahman and P. Bullock, "Soft TQM, hard TQM, and organisational performance relationships: an empirical investigation", *Omega*, vol. 33, no. 1, pp. 73-83, 2005.
- [36] S. U. Rahman, "A comparative study of TQM practice and organisational performance of SMEs with and without ISO 9000 certification", *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 18, no. 1, pp. 35-49, 2001.
- [37] I. Sila and M. Ebrahimpour, "Critical linkages among TQM factors and business results", *International journal of operations & production management*, vol. 25, no. 11, pp. 1123-1155, 2005.
- [38] D. Dow, D. Samson, and S. Ford, "Exploding the myth: do all quality management practices contribute to superior quality performance?", *Production and operations management*, vol. 8, no. 1, pp. 1-27, 1999.
- [39] S. L. Ahire, D. Y. Golhar, and M. A. Waller, "Development and validation of TQM implementation constructs", *Decision sciences*, vol. 27, no. 1, pp. 23-56, 1996.
- [40] B. B. Flynn, R. G. Schroeder, and S. Sakakibara, "The impact of quality management practices on performance and competitive advantage", *Decision sciences*, vol. 26, no. 5, pp. 659-691, 1995.
- [41] B. B. Flynn, R. G. Schroeder, and S. Sakakibara, "A framework for quality management research and an associated measurement instrument", *Journal of Operations management*, vol. 11, no. 4, pp. 339-366, 1994.
- [42] B. A. Khan and H. Naeem, "Measuring the impact of soft and hard quality practices on service innovation and organisational performance", *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 29, no. 11-12, pp. 1402-1426, 2016.
- [43] S. S. Rao, L. E. Solis, and T. S. Raghunathan, "A framework for international quality management research: development and validation of a measurement instrument", *Total Quality Management*, vol. 10, no. 7, pp. 1047-1075, 1999.
- [44] J. Domínguez, C. Ramírez, M. Murillo, L. M. Restrepo, and J. Guevara, "Nacimiento y supervivencia de las empresas en Colombia"
[Online]. Available:
http://www.confecamaras.org.co/phocadownload/Cuadernos_de_analisis_economico/Cuaderno_de_An%0%B0lisis_Economico_N_11.pdf.
- [45] J. Rave, D. La Rotta, V. Villa, G. Restrepo, and P. Zapata, "Quantification model of excellence level on EFQM enablers and its application on an inpatient service", *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 36, no. 3, pp. 243 - 252, 2013.

Tendencias de la investigación en producción y logística: Un análisis bibliométrico

Lindsay Álvarez P.¹

William Camilo R.²

Alejandro Guerrero P.³

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas

^{2,3} Universitaria Agustiniiana Uniagustiniana
Colombia

La expresión de las áreas de interés de los investigadores se plasma en las publicaciones de una disciplina determinada, las cuales, con la existencia de bases de datos científicas, permiten evaluar su avance o su consolidación en la construcción del conocimiento de las diferentes sub-áreas y herramientas utilizadas. A partir de lo anterior, el objetivo de este capítulo es determinar la evolución y las áreas clave relacionadas con la investigación en producción y logística en el contexto de la ingeniería industrial, con el fin de identificar las sub-áreas y los temas de mayor potencial e interés de desarrollo. Para ello, se lleva a cabo análisis bibliométrico para el periodo 2013-2018, a través de un diseño metodológico de corte cuantitativo, transversal, descriptivo. Inicialmente, se analizan las publicaciones de manera general, para luego examinar sub-áreas e identificar tendencias de los 50 artículos más citados que fueron publicados en Scopus durante el periodo mencionado. Los resultados muestran que la cantidad de trabajos relacionados con producción y logística se ha mantenido y siguen siendo los países desarrollados los que más publican artículos. Con el fin de identificar las tendencias de investigación en producción y logística, también se determinaron los vínculos con otras áreas del conocimiento a través de mapeo de ciencias donde se observa que las principales áreas de interés están relacionadas con industria 4.0 y sostenibilidad ambiental, y que las principales herramientas utilizadas son de tipo cuantitativo. Se concluye que el impacto de la tecnología sobre los sistemas productivos y logísticos se evidencia en la producción científica más citada. La solución de problemas reales de la industria haciendo uso de conocimiento científico es una tendencia dentro del análisis

1. INTRODUCCIÓN

La investigación en producción y logística en el contexto de la ingeniería industrial se orienta principalmente a la generación y la gestión de conocimiento para el desarrollo de sistemas que brinden soporte tecnológico a procesos productivos, operaciones de transporte y distribución, gestión de procesos logísticos y gestión de la cadena de suministro. De esta manera, los procesos de toma de decisiones en diferentes niveles involucran a fabricantes, proveedores, distribuidores y clientes, generando una gran cantidad de producción científica relacionada.

Existe consenso acerca de que el reciente esquema industrial marca una cuarta revolución industrial que se desliga de las anteriores en tanto plantea la convergencia de tecnologías digitales, físicas y biológicas de la mano con la globalización y la conectividad generadas por el internet, las cuales están dirigidas a satisfacer las necesidades de un mercado dinámico, flexible, adaptable y altamente cambiante, reflejado, por ejemplo, en esquemas de producción mediados por inteligencia artificial y/o adaptaciones automatizadas de las plantas industriales. Este nuevo contexto busca responder no solo a los grandes volúmenes de producción requeridos, sino también a condiciones de la demanda y situaciones propias del proceso productivo que implican que además de algoritmos que permitan el aprendizaje se determinen máquinas o procesos industriales capaces de aprender. A partir de lo anterior, se da lugar a la aparición de las factorías inteligentes (*smart factory*), las cuales involucran conceptos y aplicaciones de las TIC en niveles antes insospechados.

La empresa de la industria 4.0 es conceptual y operativamente diferente a la de las revoluciones anteriores, aunque se conserven aspectos de eficiencia y maximización del beneficio. Aspectos como la flexibilidad en la producción, la limitación de la mano de obra ocupada, la conectividad entre diferentes componentes partícipes en la producción y la adaptabilidad de componentes electrónicos embebidos que permiten cambios rápidos en planta, determinan cambios sustanciales no solo en la factoría, sino en el global de la cadena de abastecimiento, los cuales, a su vez, involucran cambios en el andamiaje de las relaciones sociales, tal como sucedió en las revoluciones industriales anteriores.

Así, por ejemplo, factorías inteligentes, industrias 4.0, desarrollos en inteligencia artificial y las ciencias de la información y la conectividad, abren un espectro amplio de temas de indagación que se ha visto reflejado en la literatura académica internacional, evidenciando un rezago para el caso colombiano. En esa dirección, el objetivo de este capítulo es exponer la evolución y las áreas clave relacionadas con producción y logística en el contexto de la ingeniería industrial y la industria 4.0, con el fin de identificar las sub-áreas y los temas de mayor potencial e interés de desarrollo. Esto se lleva a cabo a través de un análisis bibliométrico que comprende los últimos 5 años, con el fin de vislumbrar tendencias en la investigación en este campo de conocimiento con dos resultados importantes: *i*) un análisis descriptivo general de la producción científica alrededor de la ingeniería industrial en sí misma y *ii*) un análisis preciso, utilizando técnicas de coocurrencia de palabras, del aporte y relación de la ingeniería industrial desde la producción y logística con el desarrollo de investigaciones en industrias 4.0.

¹ lalvarez@udistrital.edu.co

² alejandro.guerrero@uniagustiniana.edu.co

³ william.rodriquez@uniagustiniana.edu.co

2. MÉTODO

Este análisis de coocurrencia se realiza en dos etapas: una búsqueda general de artículos científicos y su posterior clasificación de acuerdo con la sub-área y la técnica utilizada. En la primera etapa, se realiza la búsqueda de los 50 artículos más citados provenientes de la base de datos académica Scopus (considerando su extensión, es acorde con el objetivo de esta investigación) para identificar y analizar su evolución. Para ello, se explora en esta base de datos usando las palabras producción y logística con aparición en título, resumen y/o palabras clave, filtrando el área de ingeniería como campo de estudio para el periodo 2013-2018. El objetivo de esta etapa es analizar la evolución, en términos generales, de la producción científica relacionada con estas palabras clave. Se pretende mostrar aquí sí, en general, estas son áreas de creciente interés en el mundo académico.

Por ser “producción y logística” temas tan amplios, en la segunda etapa se identifican sub-áreas clave por medio de la respectiva revisión de resúmenes que permitan establecer y analizar tendencias en la investigación, para finalmente identificar las oportunidades, los temas o las sub-líneas de investigación con mayor potencial. En esta etapa se identifican las técnicas empleadas y los problemas y enfoques sobre los que se trabaja. La ecuación de búsqueda es la siguiente:

TITLE-ABS-KEY ("production" AND "logistic") AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2013)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI"))).

3. RESULTADOS

3.1 Tendencias generales en el área

La evolución en cuanto a número de artículos relacionados con “*production & logistic*” no muestra una tendencia de aumento o disminución en el periodo 2013-2017 (Tabla 1), con una media de 365,2 productos científicos y una desviación estándar de 29,99 no parece ser un tema próximo a agotarse (no se incluye 2018 debido a que corresponde al año en curso). Llama especialmente la atención que 50,96 % de la producción se encuentra en forma de artículos y 39,00 % en forma de artículos en conferencias (Tabla 2), mientras que se hace evidente que las publicaciones de libros no son tan comunes en la actualidad (0,56 %).

Tabla 1. Artículos publicados sobre producción y logística (2013-2017)

Año	Cantidad
2017	343
2016	384
2015	324
2014	382
2013	393

Tabla 2. Documentos publicados sobre producción y logística por tipo (2013-2018)

Tipo de documento	Cantidad
Artículo	1.005
Artículo de conferencia	769
Capítulo de libro	71
Reseña de conferencia	50
Reseña	28
Artículo en imprenta	23
Libro	11
<i>Business article</i>	4
Editorial	4
Nota	4
Encuesta corta	2
Fe de erratas	1
Total	1972

En cuanto al origen de las publicaciones, claramente países que cuentan con desarrollo industrial destacado son los que muestran una mayor producción, como el caso de China, Alemania y Estados Unidos (Tabla 3). De la región latinoamericana, destaca Brasil con 97 productos en el intervalo de tiempo estudiado, mientras que Colombia cuenta con 20, seguida de Chile con 10, Argentina con 5, Ecuador con 2 publicaciones y Panamá y Venezuela con 1 publicación, cada uno; de donde se puede deducir que no se trata de un tópico donde se tenga producción científica de impacto en la región en general, salvo por Brasil, Colombia y Chile.

Las áreas relacionadas en la búsqueda muestran un fenómeno interesante. El filtro usado fue ingeniería, arrojando como resultado que 31,9 % de los productos se encuentra relacionados con “*Business, management and accounting*”, 23,58 % con “*Computer Sciences*” y 20,49 % con “*Decision Sciences*” (Tabla 4). Si sumamos los dos últimos, se podría

decir que más de 44 % de la producción, como mínimo, podría estar mostrando el uso de métodos cuantitativos, valor que resulta interesante al ser considerado como una cota inferior. En todo caso, estas tres áreas de estudio conforman 76 % de las relacionadas en la búsqueda.

Tabla 3. Documentos publicados sobre producción y logística por país en el periodo 2013-2018

País	Total productos
China	372
Alemania	361
Estados Unidos	231
Italia	104
Brasil	97
Francia	74
Holanda	66
India	63
Reino Unido	61
Eslovaquia	51

Tabla 4. Productos publicados según sub-áreas relacionadas con la ingeniería en el periodo 2013-2018

Sub-área	Productos
Negocios, gestión y contabilidad	465
Ciencias de la computación	404
Ciencias de la decisión	294
Energía	179
Ciencia de los materiales	177
Ciencias ambientales	177
Matemáticas	114
Ingeniería química	87
Ciencias sociales	78
Economía, econometría y finanzas	73
Ciencias agrícolas y biológicas	66
Ciencias planetarias y de la Tierra	50
Química	41
Bioquímica, genética y biología molecular	24
Medicina	19
Artes y humanidades	10
Otras	7

Se analizó el número de apariciones de las *keywords* relacionadas con la búsqueda que tienen más de 90 apariciones (Tabla 5), llevando a cabo su clasificación de acuerdo con su relación directa con producción, logística o enfoques de análisis generales.

Tabla 5. Palabras clave más frecuentes en la búsqueda en el periodo 2013-2018 y su clasificación

Palabras clave	Apariciones	Clasificación
<i>Logistics</i>	417	Logística
<i>Manufacture</i>	318	Producción
<i>Supply chains</i>	278	Logística
<i>Optimization</i>	173	General
<i>Production control</i>	157	Producción
<i>Production engineering</i>	209	Producción
<i>Cost</i>	139	General
<i>Supply chain management</i>	125	Logística
<i>Decision making</i>	108	General
<i>Sustainable development</i>	92	General

El análisis de las palabras clave más frecuentes muestra en cierta forma la tendencia de investigación hacia ciertas sub-áreas, que en el caso de logística serían: *supply chains* y *supply chain management*; en el de producción: *manufacture*, *production control* y *production engineering*; y en aquellas relacionadas con enfoques generales: *optimization*, *cost*, *decision making* y *sustainable development*.

3.2 Sub-áreas, técnicas y objetos de investigación

Cada uno de los 50 artículos más citados fue clasificado según su área principal de estudio: logística, producción o perteneciente a ambas. En total, 37 artículos fueron clasificados en el área de logística; de estos, los clasificados en la sub área principal de “industria 4.0” corresponden al primer [1] y el cuarto [2] artículos más citados [1]. Por otro lado, 35,13 % de los artículos de logística tienen como subárea principal “cadena de abastecimiento” [3] – [17], 29,72 % tratan sobre “sostenibilidad ambiental” [18]–[27], 16,21 % sobre “logística de reversa” [28] – [33] y 10,81 % sobre “logística humanitaria”[34] – [37]. Aquellos clasificados principalmente en el área de producción fueron 9 artículos, de los cuales 66,6 % fue clasificado en la sub área de “industria 4.0” [38]–[42], 22,2 % en “sostenibilidad ambiental” [43], [44] y 11,1 % en “calidad de la producción” [45]. Finalmente, los clasificados como pertenecientes a las dos áreas,

es decir, tanto de “producción” como de “logística”, fueron únicamente 3 artículos, de los cuales 2 tratan sobre “sostenibilidad ambiental” [46], [47] y el restante sobre “cadena de abastecimiento” [3], [16].

En cuanto a las técnicas usadas en los documentos relacionados con logística, se destaca que 16,21 % corresponde a revisiones de estados del arte [2], [4], [19], [25], [30], [36], mientras que 44,44 % de los relacionados con producción son de este tipo [40], [43] – [45]. Los artículos clasificados como “industria 4.0” se relacionan en su mayoría con la tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés) [1], [2], [38], [39], [42], la cual está siendo usada para obtener grandes cantidades de datos que pueden servir de base para el análisis de los sistemas productivos y logísticos. El artículo con más citaciones (635) pertenece al área de producción y trata sobre manufactura aditiva, lo que comúnmente se conoce como impresión 3D [48].

3.3 Análisis de tendencias a través del mapeo de ciencias dirigidos a la Industria 4.0

El mapeo de ciencias permite construir mapas bibliométricos que describen cómo están conectadas conceptual e intelectualmente las disciplinas o los campos de investigación [49]. Dentro de las diferentes metodologías disponibles para la realización del mapeo de ciencias, se empleará la de Waltman *et al.* [50], en la cual se propone un enfoque unificado de mapeo y de agrupación de redes bibliométricas que puede ser fácilmente utilizado a través del software VOSviewer versión 1.6.8 elaborado por los mismos autores. VOSviewer dispone de dos opciones para desarrollar los enlaces de acoplamiento bibliográfico entre los términos. La primera opción es vínculo de autoría y la segunda coocurrencia entre los términos, siendo esta última la opción a emplear para la creación de los mapas relacionados con la producción y logística.

Con la ecuación de búsqueda descrita en la metodología se obtuvieron 2.052 documentos; sin embargo, Scopus permite descargar máximo 2.000 documentos con la correspondiente información de citación. Posteriormente, se realizó un proceso de refinamiento a las palabras claves de estos documentos, ya que algunos términos se pueden escribir de forma diferente, pero en esencia corresponden al mismo concepto; por ejemplo, se encontró “Internet of things” e “iot”, los cuales fueron homologados como “Internet of things”. Las Figuras 1 y 2 muestran el mapa de red y el de densidad, respectivamente, creados a partir de los conceptos refinados de los 2.000 documentos (priorizados por citación).

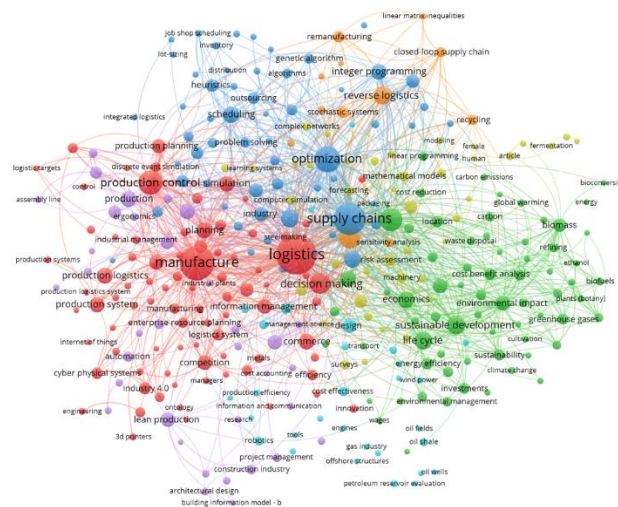


Figura 1. Análisis de coocurrencia

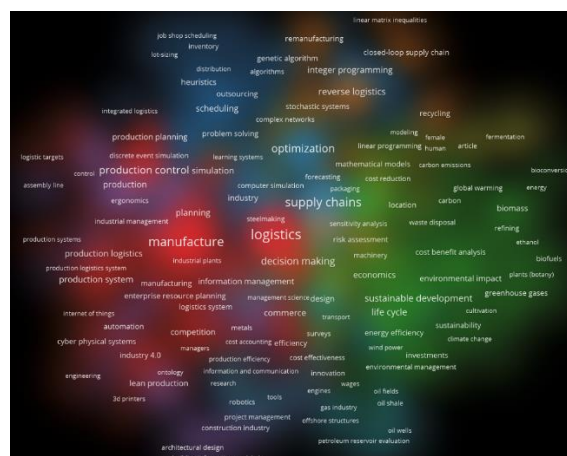


Figura 2. Mapa de densidad, análisis de coocurrencia

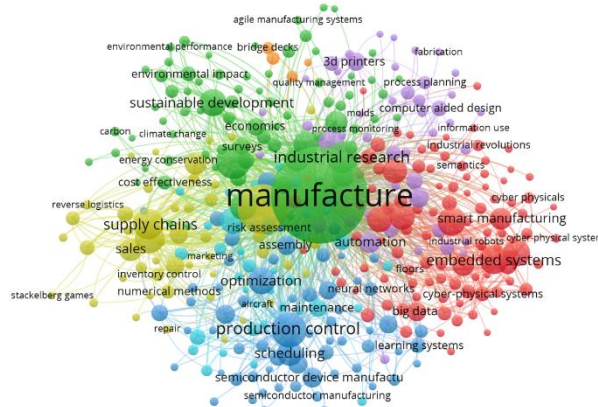


Figura 4. Análisis de coocurrencia con la ecuación de búsqueda modificada



Figura 5. Análisis de coocurrencia con la ecuación de búsqueda modificada

- **Rojo:** Este clúster es el de mayor agrupación y está conformado por 100 ítems, dentro de los cuales se destacan los conceptos relacionados con la industria 4.0, tales como, sistemas embebidos, sistemas ciberfísicos, manufactura asistida por computador, fabricación en la nube y *big data*.
- **Verde:** contiene 79 ítems y se enfoca en la manufactura y en la investigación industrial. Llama la atención las redes generadas en este clúster, las cuales contienen varias palabras de gestión y tendencias actuales como la producción esbelta, el desarrollo sostenible y sus enlaces con el ciclo de vida de los productos y la administración del ambiente.
- **Azul:** El tercer clúster con 63 ítems muestra la relación más evidente entre la factoría “convencional” y los desarrollos tecnológicos de la industria 4.0, ya que, si bien contiene el control de producción y la optimización, la cual conlleva a los conceptos de algoritmos, heurísticas y algunas metaheurísticas como la optimización por enjambre de partículas, también cuenta con agrupaciones orientadas a *data mining*, el aprendizaje de sistemas, *machine learning* e inteligencia artificial.
- **Amarillo:** con 49 ítems este clúster contempla la mayor agrupación de las cadenas de abastecimiento, comercialización y distribución, así como lo relacionado con costeo.
- **Púrpura:** Este clúster contiene solo 4 ítems menos que el anterior y está relacionado con el diseño, el diseño asistido por computadora y las impresoras 3D.
- **Azul turquesa y naranja:** estos dos clústeres con 40 y 5 ítems, respectivamente, no muestran una agrupación fuerte respecto al objeto de estudio, el primero muestra una relación con la industria automotriz y el segundo con el desarrollo regional y la agricultura.

Finalmente, en la Figura 6 se muestra el mapa de superposición el cual contiene el desarrollo a lo largo del tiempo de los ítems. En este mapa se evidencia en primera medida que entre los años 2017 y 2018 se encuentra el mayor cambio de tendencia y los artículos más citados, ya que al modificar los límites se encuentra la concentración de KW+ en estos años tomando el mapa un tono amarillo generalizado. Analizando a detalle el mapa de superposición se encuentra que hacia el año 2017.7 (color morado) las KW destacadas hacen referencia al desarrollo industrial de dicha época y de estos sistemas de producción, las palabras son:

- Solución de problemas
- Análisis de sistemas
- Administración de la producción
- Lógica difusa
- Sistemas flexibles de manufactura

- [4] E. H. Grosse, C. H. Glock, M. Y. Jaber y W. P. Neumann, "Incorporating human factors in order picking planning models: Framework and research opportunities", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 53, no. 3, pp. 695-717, 2015.
- [5] K. Govindan, S. G. Azevedo, H. Carvalho, y V. Cruz-Machado, "Impact of supply chain management practices on sustainability", *J. Clean. Prod.*, vol. 85, pp. 212-225, 2014.
- [6] M. K. Delivand, A. R. B. Cammerino, P. Garofalo y M. Monteleone, "Optimal locations of bioenergy facilities, biomass spatial availability, logistics costs and GHG (greenhouse gas) emissions: A case study on electricity productions in South Italy", *J. Clean. Prod.*, vol. 99, pp. 129-139, 2015.
- [7] F. Wiengarten, M. Pagell, M. U. Ahmed y C. Gimenez, "Do a country's logistical capabilities moderate the external integration performance relationship?", *J. Oper. Manag.*, vol. 32, no. 1-2, pp. 51-63, 2014.
- [8] Y. Jin, M. Vonderembse, T. S. Ragu-Nathan, y J. T. Smith, "Exploring relationships among IT-enabled sharing capability, supply chain flexibility, and competitive performance", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 153, pp. 24-34, 2014.
- [9] S. Panda, "Coordination of a socially responsible supply chain using revenue sharing contract", *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 67, pp. 92-104, 2014.
- [10] M. Ebadian, T. Sowlati, S. Sokhansanj, L. Townley-Smith y M. Stumborg, "Modeling and analysing storage systems in agricultural biomass supply chain for cellulosic ethanol production", *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 840-849, 2013.
- [11] A. Jindal y K. S. Sangwan, "Closed loop supply chain network design and optimisation using fuzzy mixed integer linear programming model", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no. 14, pp. 4156-4173, 2014.
- [12] G. Reiner, C. Teller y H. Kotzab, "Analyzing the efficient execution of in-store logistics processes in grocery retailing - The case of dairy products", *Prod. Oper. Manag.*, vol. 22, no. 4, pp. 924-939, 2013.
- [13] A. I. A. Mofadal, K. Kanitpong y P. Jiwattanakulpaisarn, "Analysis of pedestrian accident costs in Sudan using the willingness-to-pay method", *Accid. Anal. Prev.*, vol. 78, pp. 201-11, 2015.
- [14] D. Gonzales, E. M. Searcy y S. D. Ekşioğlu, "Cost analysis for high-volume and long-haul transportation of densified biomass feedstock", *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 49, pp. 48-61, 2013.
- [15] S. E. Zeltmann, N. Gupta, N. G. Tsoutsos, M. Maniatakos, J. Rajendran y R. Karri, "Manufacturing and Security Challenges in 3D Printing", *JOM*, vol. 68, no. 7, pp. 1872-1881, 2016.
- [16] M. Ben-Daya, R. As'Ad y M. Seliaman, "An integrated production inventory model with raw material replenishment considerations in a three-layer supply chain", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 143, no. 1, pp. 53-61, 2013.
- [17] M. Ben-Daya, R. As'Ad, M. Seliaman, R. Y. Zhong, S. Lan, C. Xu, Q. Dai y G. Q. Huang, "An integrated production inventory model with raw material replenishment considerations in a three layer supply chain", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 143, no. 1, pp. 53-61, 2016.
- [18] M. O. P. Fortier, G. W. Roberts, S. M. Stagg-Williams y B. S. M. Sturm, "Life cycle assessment of bio-jet fuel from hydrothermal liquefaction of microalgae", *Appl. Energy*, vol. 122, pp. 73-82, 2014.
- [19] R. Kajaste, "Chemicals from biomass - Managing greenhouse gas emissions in biorefinery production chains - A review", *J. Clean. Prod.*, vol. 75, pp. 1-10, 2014.
- [20] S. Sacchelli, I. De Meo y A. Paletto, "Bioenergy production and forest multifunctionality: A trade-off analysis using multiscale GIS model in a case study in Italy", *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 10-20, 2013.
- [21] U. Ramanathan, Y. Bentley y G. Pang, "The role of collaboration in the UK green supply chains: An exploratory study of the perspectives of suppliers, logistics and retailers", *J. Clean. Prod.*, vol. 70, pp. 231-241, 2014.
- [22] J. van Eijck, B. Batidzirai y A. Faaij, "Current and future economic performance of first and second generation biofuels in developing countries", *Appl. Energy*, vol. 135, pp. 115-141, 2014.
- [23] B. Notarnicola, G. Tassielli, P. A. Renzulli, V. Castellani y S. Sala, "Environmental impacts of food consumption in Europe", *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 753-765, 2017.
- [24] C. Brand, A. Goodman, H. Rutter, Y. Song y D. Ogilvie, "Associations of individual, household and environmental characteristics with carbon dioxide emissions from motorised passenger travel", *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 158-169, 2013.
- [25] M. Kurdve, S. Shahbazi, M. Wendin, C. Bengtsson y M. Wiktorsson, "Waste flow mapping to improve sustainability of waste management: A case study approach", *J. Clean. Prod.*, vol. 98, pp. 304-315, 2015.
- [26] Y. Dalgic, I. Lazakis, I. Dinwoodie, D. McMillan y M. Revie, "Advanced logistics planning for offshore wind farm operation and maintenance activities", *Ocean Eng.*, vol. 101, pp. 211-226, 2015.
- [27] R. Jedermann, U. Praeger, M. Geyer y W. Lang, "Remote quality monitoring in the banana chain", *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 372, no. 2017, 2014.
- [28] A. Atasu, L. B. Toktay y L. N. Van Wassenhove, "How collection cost structure drives a manufacturer's reverse channel choice", *Prod. Oper. Manag.*, vol. 22, no. 5, pp. 1089-1102, 2013.
- [29] R. Subramoniam, D. Huisingh, R. B. Chinnam y S. Subramoniam, "Remanufacturing Decision-Making Framework (RDMF): Research validation using the analytical hierarchical process", *J. Clean. Prod.*, vol. 40, pp. 212-220, 2013.
- [30] K. Govindan y H. Soleimani, "A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus" *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 371-384, 2017.
- [31] K.-H. Lai, S. J. Wu y C. W. Y. Wong, "Did reverse logistics practices hit the triple bottom line of Chinese manufacturers? *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 146, no. 1, pp. 106-117, 2013.
- [32] V. De Rosa, M. Gebhard, E. Hartmann y J. Wollenweber, "Robust sustainable bi-directional logistics network design under uncertainty", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 145, no. 1, pp. 184-198, 2013.
- [33] E. Bazan, M. Y. Jaber y A. M. A. El Saadany, "Carbon emissions and energy effects on manufacturing-remanufacturing inventory models", *Comput. Ind. Eng.*, vol. 88, pp. 307-316, 2015.
- [34] N. Altay y R. Pal, "Information diffusion among agents: Implications for humanitarian operations", *Prod. Oper. Manag.*, vol. 23, no. 6, pp. 1015-1027, 2014.
- [35] M. Besiou, A. J. Pedraza-Martinez y L. N. Van Wassenhove, "Vehicle supply chains in humanitarian operations: Decentralization, operational mix, and earmarked funding", *Prod. Oper. Manag.*, vol. 23, no. 11, pp. 1950-1965, 2014.
- [36] M. K. Starr y L. N. Van Wassenhove, "Introduction to the special issue on humanitarian operations and crisis management", *Prod. Oper. Manag.*, vol. 23, no. 6, pp. 925-937, 2014.
- [37] E. Gralla, J. Goentzel y C. Fine, "Assessing trade-offs among multiple objectives for humanitarian aid delivery using expert preferences", *Prod. Oper. Manag.*, vol. 23, no. 6, pp. 978-989, 2014.

- [38] Z. X. Guo, E. W. T. Ngai, C. Yang y X. Liang, "An RFID-based intelligent decision support system architecture for production monitoring and scheduling in a distributed manufacturing environment", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 159, pp. 16-28, 2015.
- [39] T. Qu, S. P. Lei, Z. Z. Wang, D. X. Nie, X. Chen y G. Q. Huang, "IoT-based real-time production logistics synchronization system under smart cloud manufacturing", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 84, no. 1-4, pp. 147-164, 2016.
- [40] G. Fantoni, M. Santochi, G. Dini, K. Tracht, B. Scholz-Reiter, J. Fleischer, T. Kristoffer Lien, G. Seliger, G. Reinhart, J. Franke, H. Nørgaard Hansen y A. Verl, "Grasping devices and methods in automated production processes", *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 63, no. 2, pp. 679-701, 2014.
- [41] A. S. Abrahams, W. Fan, G. A. Wang, Z. Zhang y J. Jiao, "An integrated text analytic framework for product defect discovery", *Prod. Oper. Manag.*, vol. 24, no. 6, pp. 975-990, 2015.
- [42] J. Fang, G. Q. Huang y Z. Li, "Event-driven multi-agent ubiquitous manufacturing execution platform for shop floor work-in-progress management", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 51, no. 4, pp. 1168-1185, 2013.
- [43] D. Chiamonti, M. Prussi, M. Buffi y D. Tacconi, "Sustainable bio kerosene: Process routes and industrial demonstration activities in aviation biofuels", *Appl. Energy*, vol. 136, pp. 767-774, 2014.
- [44] G. Ji, A. Gunasekaran y G. Yang, "Constructing sustainable supply chain under double environmental medium regulations", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 147, no. PART B, pp. 211-219, 2014.
- [45] M. Colledani, T. Tolio, A. Fischer, B. Iung, G. Lanza, R. Schmitt y J. Váncza, "Design and management of manufacturing systems for production quality", *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 63, no. 2, pp. 773-796, 2014.
- [46] M. Manfredi y G. Vignali, "Life cycle assessment of a packaged tomato puree: A comparison of environmental impacts produced by different life cycle phases", *J. Clean. Prod.*, vol. 73, pp. 275-284, 2014.
- [47] V. Gonela y J. Zhang, "Design of the optimal industrial symbiosis system to improve bioethanol production," *J. Clean. Prod.*, vol. 64, pp. 513-534, 2014.
- [48] W. E. Frazier, "Metal additive manufacturing: A review", *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 6, pp. 1917-1928, 2014.
- [49] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma y F. Herrera, "Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools", *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 62, no. 7, pp. 1382-1402, 2011.
- [50] L. Waltman, N. J. van Eck y E. C. M. Noyons, "A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks", *J. Informetr.*, vol. 4, no. 4, pp. 629-635, 2010.

Eduyn López S.¹
William C. Rodríguez V.²
Alejandro Guerrero P.³

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas
^{2,3} Universitaria Agustiniiana Uniagustiniana
Colombia

Este documento presenta un análisis de la toma de decisiones en el campo de la ingeniería de servicios, el cual es un cuerpo teórico de conocimiento multidisciplinario que involucra áreas diversas como el diseño, la gestión, la ingeniería industrial, la economía, la psicología, la investigación de operaciones, entre otras, con el fin de diseñar, gestionar y optimizar aquellos sistemas caracterizados por la intangibilidad en sus salidas y la inseparabilidad del cliente y el proveedor, como es el caso de los sistemas de servicios. En ese sentido, esta investigación presenta un análisis de la literatura científica en ingeniería de servicios, con énfasis en los problemas para la toma de decisiones a nivel estratégico, táctico y operativo. Lo anterior permite identificar tendencias de investigación en la toma de decisiones en ingeniería de servicios.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las empresas de servicios dependen de su adaptabilidad y flexibilidad a las transformaciones del entorno competitivo y, en general, a cambios en las tendencias del mercado, el cual gira en torno a las necesidades del cliente representadas en términos de calidad, cantidad y tiempo, entre otros atributos. Las expectativas del cliente son dinámicas y se modifican a partir de perspectivas como el rendimiento, la confiabilidad, el servicio, la durabilidad, el tiempo de respuesta, la reputación de una empresa/producto, entre otras, siendo el cliente además quien percibe y define la calidad y los precios.

En la búsqueda de competitividad, los servicios deben incrementar su productividad, mejorar sus sistemas de información y dirigir de manera coordinada las funciones de su organización. Para lograrlo, es necesario contar con una administración eficiente de los recursos, razón por la cual las organizaciones tendrán que enfrentar procesos de reconversión, reestructuración o reorganización, así como de transformación de su mentalidad empresarial. Parte de ese proceso de cambio tiene que ver con el proceso de toma de decisiones para administrar sus recursos y lograr sus metas. De acuerdo con López y Méndez [1] y López et al. [2], los sistemas de servicios requieren de distintas estrategias para el manejo eficiente de sus recursos y un adecuado proceso de toma de decisiones. Como respuesta a esta necesidad imperiosa, surgió en 2006 un campo de conocimiento conocido como Service science, management, and engineering (SSME), o Ciencia, gestión e ingeniería de servicios [3], [4].

La SSME es una integración interdisciplinaria de áreas de investigación como la gestión de operaciones, la ingeniería industrial, el mercadeo, la psicología, la informática, los sistemas de información, el diseño, y otros, que son aplicados para en diseño, la gestión, el control y la mejora continua de los sistemas de servicios [5], [6]. Al respecto, Martínez y Lázaro [7] justifican esta disciplina con base tres componentes:

- *Ciencia*: en referencia a la creación de conocimiento.
- *Gestión*: búsqueda de transformación de ese conocimiento en valor agregado para el sistema de servicios
- *Ingeniería*: el manejo de herramientas cuantitativas aporta a los sistemas de servicios, el cual se suma al enfoque de análisis económico y administrativo clásico de la administración de operaciones.

Considerando lo anterior, el objetivo de este documento es presentar un análisis sobre las tendencias en los procesos de toma de decisiones dentro de este campo de estudio, a partir del análisis del enfoque jerárquico en los niveles estratégico, táctico y operativo de las empresas de servicios. Para ello, este capítulo se organiza de la siguiente manera: luego de la presente introducción, el segundo apartado expone las generalidades de los sistemas de servicios y la ciencia de los servicios; en el tercer apartado presenta el enfoque metodológico de la revisión y análisis efectuado; la cuarta sección da a conocer los resultados sobre las tendencias identificadas en el proceso de toma de decisiones; finalmente, se presentan las conclusiones y posibles líneas de investigación a partir del análisis de resultados.

2. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE SERVICIOS Y LA SSME

Los sistemas de servicios tienen gran importancia en la economía mundial, debido a que representan cerca del 70% del Producto Interno Bruto (PIB) global. Durante los últimos 14 años, estos sistemas han conservado proporciones similares, pasando de representar 66% del PIB mundial en 2000 a 70,5% en 2014, según datos del Banco Mundial. La

¹ erlopezs@udistrital.edu.co

² william.rodriquez@uniagustiniana.edu.co

³ coor.investigaciones@uniagustiniana.edu.co

Figura 1 muestra información histórica del valor agregado de este sector de la economía como porcentaje del PIB durante este periodo. En Colombia, se evidencia una tendencia similar a la de otros países de América Latina. Sin embargo, las cifras nacionales siguen estando por debajo de los niveles de países como Alemania y Estados Unidos y del promedio mundial.

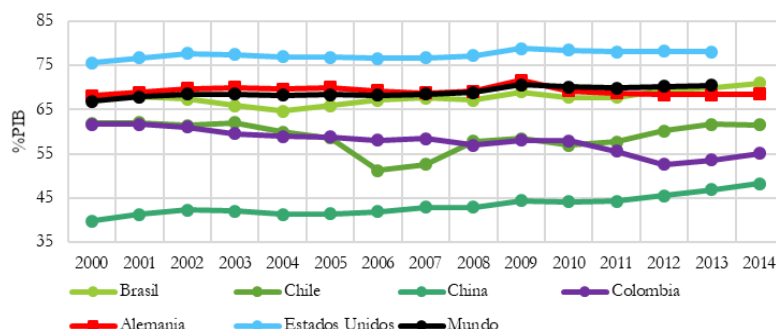


Figura 1. Valor agregado de los servicios como porcentaje del PIB

2.1 Sistemas de servicios

La Tabla 1 presenta algunas de las principales definiciones de sistemas de servicios en la literatura y la clasificación según su enfoque.

Tabla 29. Definiciones de sistemas de servicios

	Definición	Enfoque
[9]	Conjunto de actividades realizadas por recursos mecánicos (máquinas) o humanos (personas) para satisfacer las necesidades o deseos de personas.	Investigación de operaciones
[10]	Sistemas en los que los proveedores prestan un servicio a los clientes, a diferencia de los sistemas de manufactura donde trabajadores producen o ensamblan productos o mercancías.	Investigación de operaciones
[10]	Sistemas hechos por el hombre que buscan mejorar la interacción cliente-proveedor, e. g. el gobierno, la educación, la salud, las finanzas, <i>retail</i> , edificios, comunicaciones, energía, alimentos, agua y transporte.	Ciencia de servicios
[11], [12]	Aplicación de competencias para el beneficio de otra parte, las cuales se manifiestan en una compleja combinación de bienes, dinero y actividades dentro de un sistema de servicio.	Ciencia de los servicios
[13]	Distribución dinámica de recursos como tecnología, personas e información, que crea y ofrece un valor entre el proveedor y el cliente a través del servicio.	Ciencia de los servicios
[14]	Configuración dinámica entre un cliente y un proveedor, caracterizada por ser diversa, compleja, cambiante en el tiempo y generadora de valor.	Gestión
[15]	Organización compuesta por un conjunto recursos que interactúan para el cumplimiento de las expectativas del cliente.	Gestión
[8]	Productos intangibles. Intercambio entre entidades económicas que no transfiere la propiedad pero permite el acceso a recursos y capacidades	Economía
[8]	Actividades, procesos e interacciones que no producen bienes. Proceso que se realiza en lugar de un producto y que requiere la colaboración de una entidad de cliente.	Operaciones
[8]	Fenómenos de co creación de valor entre las entidades que interactúan en el sistema de servicios.	Ciencia de los Servicios

Como plantean Spohrer et al. [8], el elemento común en las definiciones sobre este fenómeno es el concepto de entidades que interactúan para lograr resultados mutuamente aceptables y beneficiosos. Adicionalmente, se resalta el papel de las interacciones y los resultados, el cual pone de manifiesto la importancia del cliente dentro del proceso de servicio.

2.2 Toma de Decisiones en la SSME

Para gestionar los sistemas de servicios existen diferentes niveles de toma de decisiones, que pueden ser extraídos del enfoque jerárquico para la toma de decisiones en gestión de operaciones [16] presentado en la Figura 2. En el nivel estratégico (o largo plazo), las decisiones establecen los objetivos, los recursos y las políticas de la organización en un horizonte de planificación a largo alcance. Al respecto, un problema típico consiste en pronosticar el tipo de servicios a prestar y la capacidad necesaria en los próximos tres años. A nivel táctico (o de mediano plazo), la preocupación de decisiones para determinar a grosso modo los recursos necesarios para la ejecución del servicio en un horizonte de planificación a medio alcance. Un problema común de este nivel es la determinación de la fuerza de trabajo que será requerida en seis meses.

En cuanto al nivel operacional, las decisiones determinan cómo llevar a cabo las tareas específicas a realizar para la prestación de un servicio en un horizonte de planificación a corto plazo. La asignación de una persona para realizar una tarea específica a una hora determinada es un ejemplo dentro de este nivel. La complejidad de los problemas

aumenta desde el nivel estratégico hasta el nivel operativo, puesto que incrementa la información requerida y disminuye el tiempo de respuesta. De esta manera, la ciencia de los servicios se convierte en una disciplina que busca gestionar los sistemas de servicios e identificar cómo la ingeniería puede contribuir a la provisión de técnicas para la toma de decisiones.

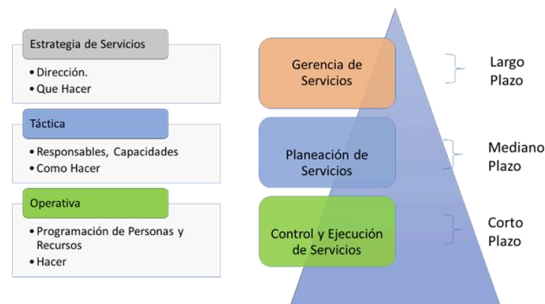


Figura 26. Estructura jerárquica de la toma de decisiones en gestión de operaciones

3. MÉTODO

De acuerdo con los antecedentes presentados en la anterior sección, se establece como primer paso revisar los principales problemas para la toma de decisiones dentro de los sistemas de servicios, particularmente en los niveles estratégico, táctico y operativo. La metodología para la revisión y análisis tendrá un enfoque conceptual de los tres niveles de toma de decisiones y presentará una taxonomía de la literatura relacionada con cada uno de ellos. Primero, se presenta la búsqueda en bases de datos científicas, en este caso Scopus, de acuerdo con la Figura 3, la fase 1¹ de búsqueda inicial identifica las referencias relacionadas con la SSME para el periodo en observación, a través de las palabras clave descritas. Luego, se procede con una fase de búsqueda específica fase 2², en la cual se hará un filtro de las referencias en las áreas de conocimiento relacionadas con los niveles estratégico, táctico y operativo Figura 3. La fase 3³ se limita a las áreas de conocimiento relevantes para el objeto de estudio y a los documentos tipo artículo, artículo de conferencia y revisión de literatura en idioma inglés. Finalmente, en la fase 4 se selecciona una muestra de 50 documentos de acuerdo con el mayor número de citas y su relevancia para el objeto de estudio. Además, se seleccionó manualmente un total de 15 documentos relacionados con el enfoque operativo de la toma de decisiones en los sistemas de servicios en cuanto ruteo (*routing*) y programación (*scheduling*). Se seleccionaron revisiones de literatura y aplicaciones pertinentes.

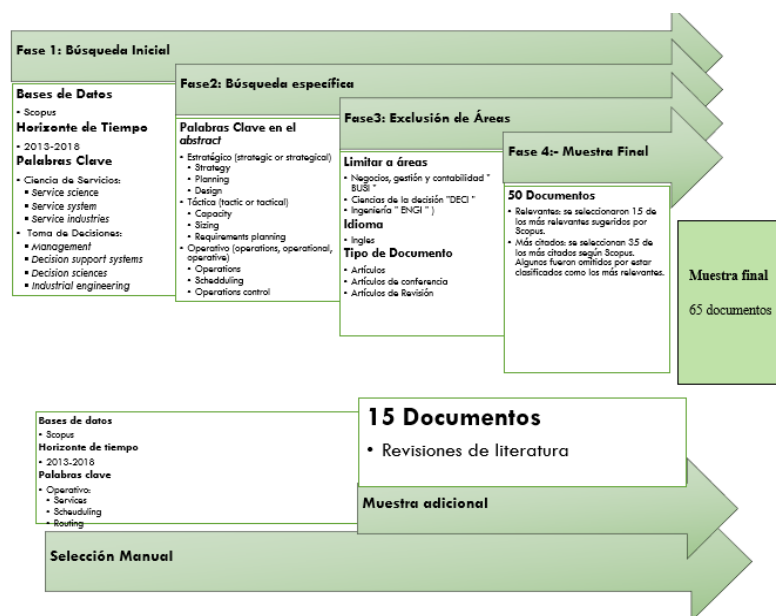


Figura 3. Estrategia

¹ Ecuación de búsqueda Fase 1: TITLE-ABS-KEY (management OR {{decision support systems}} OR {decision sciences} OR {industrial engineering}) AND (TITLE-ABS-KEY ({service science} OR {service system} OR {service industries}) AND PUBYEAR > 2012).

² Ecuación de búsqueda Fase 2: TITLE-ABS-KEY (management OR {{decision support systems}} OR {decision sciences} OR {industrial engineering}) AND (TITLE-ABS-KEY ({service science} OR {service system} OR {service industries}) AND PUBYEAR > 2012) AND (ABS ((strategy OR planning OR design) OR (capacity OR sizing OR {requirements planning}) OR (operations OR scheduling OR {operations control}))).

³ Ecuación de búsqueda Fase 3: TITLE-ABS-KEY (management OR {{decision support systems}} OR {decision sciences} OR {industrial engineering}) AND (TITLE-ABS-KEY ({service science} OR {service system} OR {service industries}) AND PUBYEAR > 2012) AND (ABS ((strategy OR planning OR design) OR (capacity OR sizing OR {requirements planning}) OR (operations OR scheduling OR {operations control}))) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "BUSI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "DECI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) .

4. RESULTADOS

En esta sección en primer lugar, se presentará un análisis de la búsqueda inicial y específica. Luego, se presentarán las clasificaciones efectuadas respecto a problemas estratégicos, tácticos y operativos.

4.1 Clasificación de la revisión de Scopus

La Figura 4 presenta la relación de artículos encontrados en función del número de documentos por año y el porcentaje de acuerdo con el tipo de documento, a partir de la muestra inicial de 1.237 documentos. Se observa una tendencia estable en el tiempo desde 2012 hasta 2017. Respecto al tipo de documento, se observa que 51% corresponde a artículos científicos, 37% a artículos de conferencia, 4% a revisiones de literatura, 3% a capítulos de libro y 1% a libros. Las demás clasificaciones representan menos del 1%.

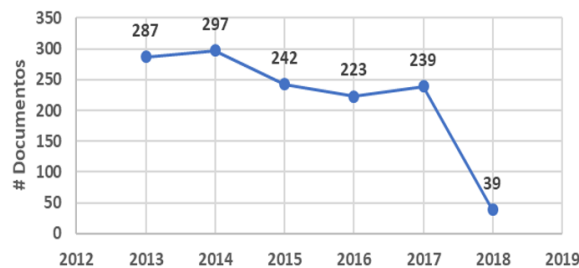


Figura 4. Número de documentos en Scopus por año y tipo para la fase 1

En la Figura 5 se observa que 39% de los 1.327 documentos se encuentran relacionados con ingeniería, siendo este el eje temático con mayor participación, seguido por ciencias de la computación con 32%, negocios, gestión y contabilidad con 31%, ciencias de la decisión con 16%, ciencias sociales, medicina y matemáticas con 11% cada una. Las 18 áreas restantes tienen una participación inferior a 6%.

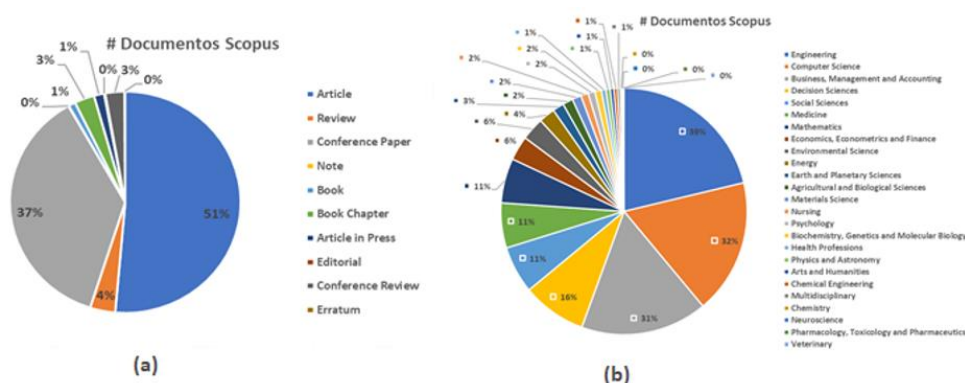


Figura 5. Resultados del tipo de documentos (a) y resultados del área de conocimiento (b) para la fase 1

En la fase 2 se encontraron 663 documentos al aplicar el filtro de las palabras clave estratégico, táctico y operativo, y el filtro de la fuente de documentos, como se muestra en la Figura 6. Se observa que la mayoría de los documentos están clasificados en el aspecto estratégico y operacional, y solo unos pocos en el táctico.

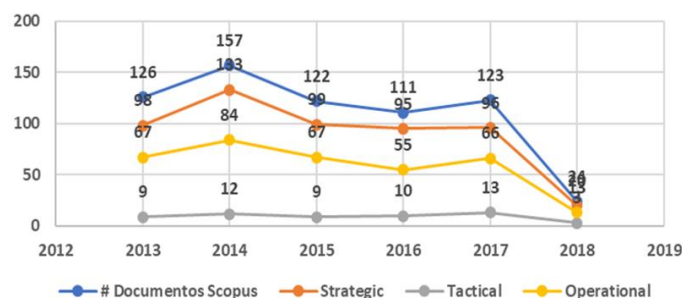


Figura 6. Resultados de documentos por año para la fase 2

En cuanto al tipo de documento, en la Figura 7 muestra que 58% son artículos, 29% artículos de conferencia y 7% artículos de revisión de literatura. Se evidencia que la mayoría de las publicaciones están concentradas en las categorías artículos de investigación (54%) y artículos de conferencia (33%), mientras que las revisiones de literatura reportan una participación menor (3%), por tanto, la siguiente fase se limita al análisis de estos tres tipos de documentos.

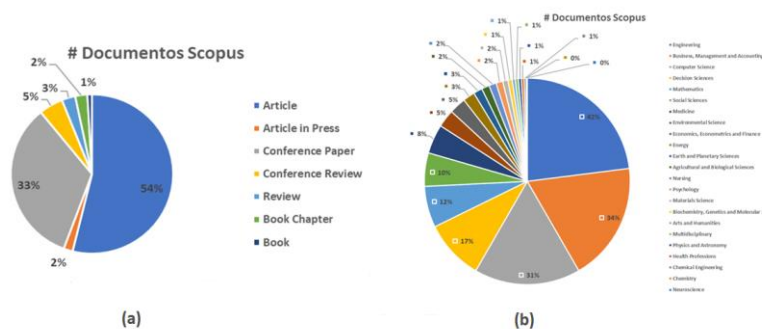


Figura 7. Resultados del tipo de documentos (a) y resultados del área de conocimiento (b) para la fase 2

Respecto al área de conocimiento, la Figura 7 presenta los resultados del porcentaje de los 663 documentos para cada área. En este caso, se encontraron resultados similares para las 4 primeras áreas identificadas; las demás son inferiores a 12%, por tanto, son excluidas de la siguiente fase.

Para la fase 3 se aplicaron los filtros indicados anteriormente, lo cual arrojó un registro de 397 documentos. La Figura 8 presenta el número de documentos por año para cada clasificación de acuerdo con la búsqueda mediante las palabras clave: estratégico, táctico y operativo. Se observa que la mayoría de los documentos se encuentran catalogados en los aspectos operacional y estratégico, mientras que solo unos pocos hacen parte del componente táctico. Por su parte, la Figura 8 muestra que para la variable tipo de documento 56% de la muestra corresponde a artículos, 42% a artículos de conferencia y 2% a revisiones de literatura.

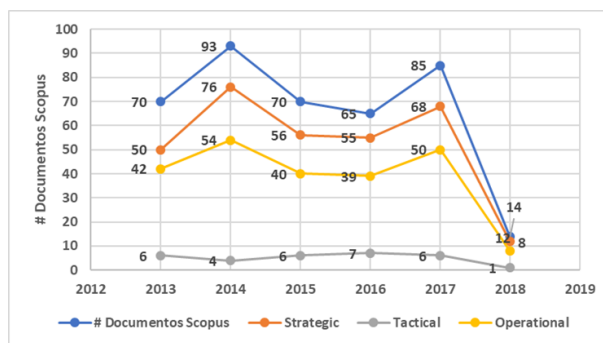


Figura 8. Resultados del tipo de documentos para la fase 2

Respecto al área de conocimiento, la Figura 9 muestra los resultados porcentuales de los 268 documentos para cada una de las cuatro áreas seleccionadas, siendo ingeniería la de mayor participación (59%), seguida de negocios, gestión y contabilidad (51%), ciencias de la decisión (26%). No obstante, debido a que los documentos se encuentran clasificados en distintas áreas, se observa que ciencias de la decisión obtuvo una participación de 24% y matemáticas de 10%, mientras que las demás áreas tienen una participación inferior a 6%.

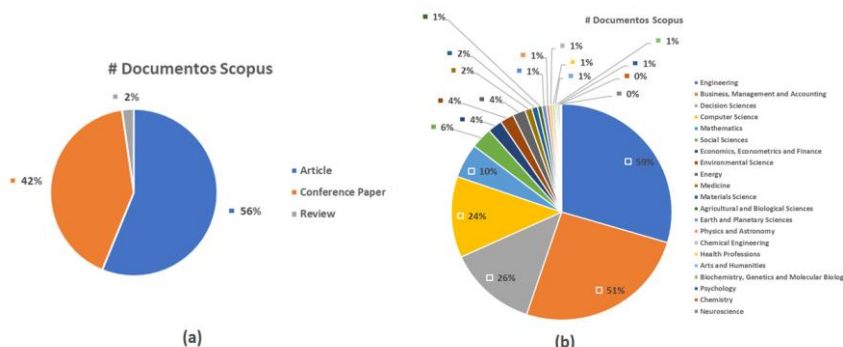


Figura 9. Resultados del tipo de documentos (a) y resultados del área de conocimiento (b) para la fase 3

Finalmente, en la fase 4, de los 397 documentos obtenidos tras la aplicación de los filtros antes mencionados, se seleccionó una muestra de 50 registros con base en el nivel de relevancia (los 15 primeros de los 205 sugeridos por Scopus) y de citación (los 35 más citados en Scopus y que además no estuvieron en los 15 relevantes). La Figura 10, presenta los resultados del número de documentos por año para la muestra de 50 artículos. En este caso, se observa una tendencia similar para los documentos clasificados en los aspectos estratégico y operativo. Sin embargo, se confirma la baja participación de aquellos relacionados con el nivel táctico, con solo 3 publicaciones en 2013, una en 2014 y una en 2015.

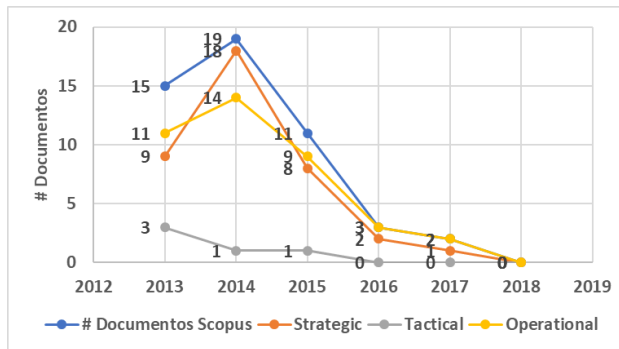


Figura 10. Número de documentos por año para la fase 4

La Figura 11 muestra la distribución de acuerdo con el tipo de documento para esta misma muestra, en la que la participación de artículos publicados en revistas indexadas creció hasta alcanzar 74%, mientras que los artículos de conferencias y los de revisión tuvieron una participación de 20% y 6%, respectivamente.

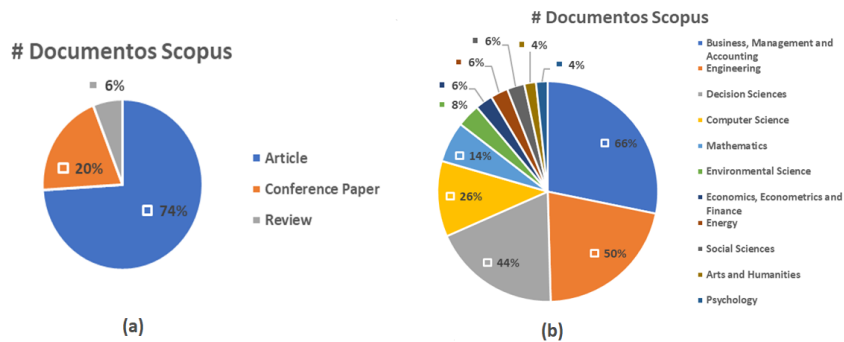


Figura 11. Resultados del tipo de documentos (a) y resultados del área de conocimiento (b) para la fase 4

En lo que tiene que ver con el área de conocimiento, se observan cambios importantes (Figura 11). con una mayor participación de la categoría negocios, gestión y contabilidad (66%), seguida de ingeniería (50%). Luego esta Ciencias de la Decisión con 44% seguida de Ciencias de la computación con 26% y Matemáticas con 14%. Se observa que la distribución cambio respecto a las anteriores muestras, y esto sugiere una tendencia creciente de la participación de las áreas de gestión en esta muestra seleccionada.

Con respecto a las clasificaciones del ámbito estratégico, táctico y operativo, la Figura 12 muestra los resultados de la comparación de los documentos clasificados en una de las áreas analizadas y sus intersecciones respectivas con las tres muestras consideradas. Hay una tendencia hacia los aspectos estratégicos en la toma de decisiones para las tres muestras y en segundo lugar se encuentran los aspectos de tipo operativo. Adicionalmente, se observa una mayor participación en la intersección de aspectos estratégicos y operacionales en las tres muestras, con una menor participación de los aspectos tácticos.

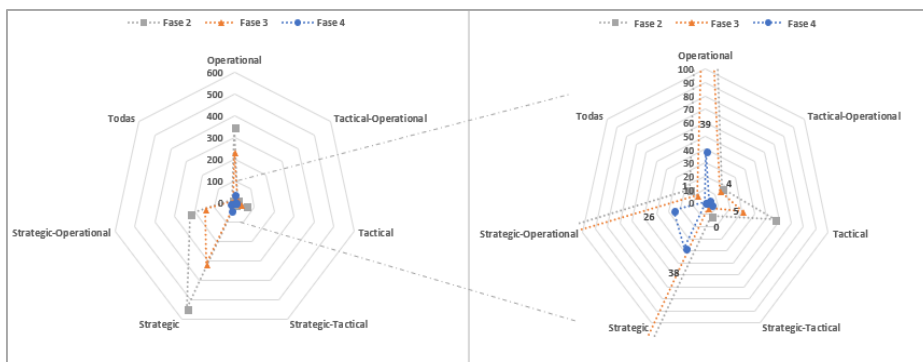


Figura 12. Resultados comparativos de las áreas de clasificación de las muestras en las tres fases

Este comportamiento permite identificar una tendencia de investigación en la literatura científica hacia los problemas de decisión en el ámbito estratégico dentro de la industria de los servicios que refleja la importancia de este aspecto para la toma de decisiones, considerando su impacto en el largo plazo. Por otro lado, se evidencia una baja participación de los aspectos tácticos y operativos, los cuales representan las situaciones del día a día en las empresas tanto de manufactura como de servicios, en este caso. En la siguiente sección se analizará el alcance de la decisión en cada uno de estos aspectos, con el fin de identificar los problemas de toma de decisiones y sus tendencias de investigación.

4.2 Análisis clasificación muestra final

La clasificación de Scopus arrojó una muestra de 50 documentos, a los cuales se adicionaron 15 documentos tras una búsqueda manual, dando como resultado una muestra final de 65 documentos. Para esta muestra se toma una clasificación realizada con base en el alcance de la decisión de cada uno los documentos en cuanto al ambiente estratégico, táctico y operativo, mas no con respecto a la clasificación de Scopus. La Figura 13, muestra los resultados del número de documentos por año para la muestra final de 65 artículos. En este caso, se observa una tendencia similar a la muestra de la fase 4; sin embargo, se encuentra un mayor número de documentos en el aspecto estratégico.

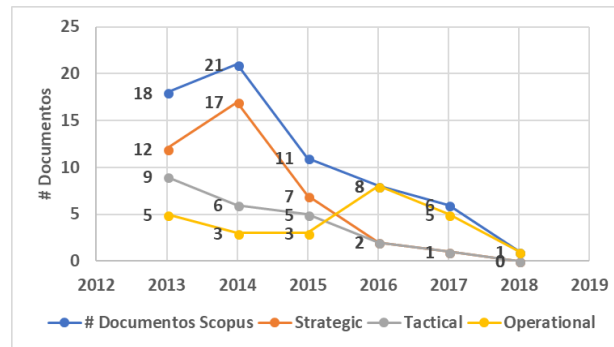


Figura 13. Resultados comparativos de las áreas de clasificación de las muestras en las tres fases

La Figura 14 muestra la distribución de acuerdo con el tipo de documento para esta muestra. En este caso, la participación de artículos en revistas indexadas alcanzó 68%, la de artículos de conferencia 17%, y la de artículos de revisión 14%, con 1% de participación de las revisiones cortas.

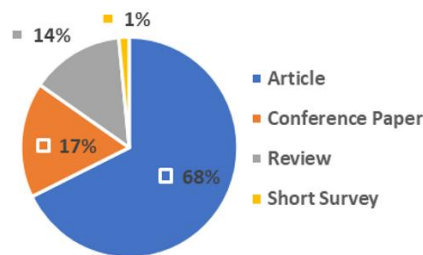


Figura 14. Tipos de documentos para la muestra final

Respecto a las clasificaciones del ámbito estratégico, táctico y operativo, la Figura 15, muestra la comparación de los documentos clasificados en una de las áreas y sus intersecciones respectivas para las tres fases y la muestra final. Respecto al alcance de la decisión para esta última clasificación, se observa un cambio en la distribución de los documentos, incrementando la participación de los aspectos tácticos de la toma de decisiones y disminuyendo los estratégicos y los operativos. La tendencia en las intersecciones se mantiene.

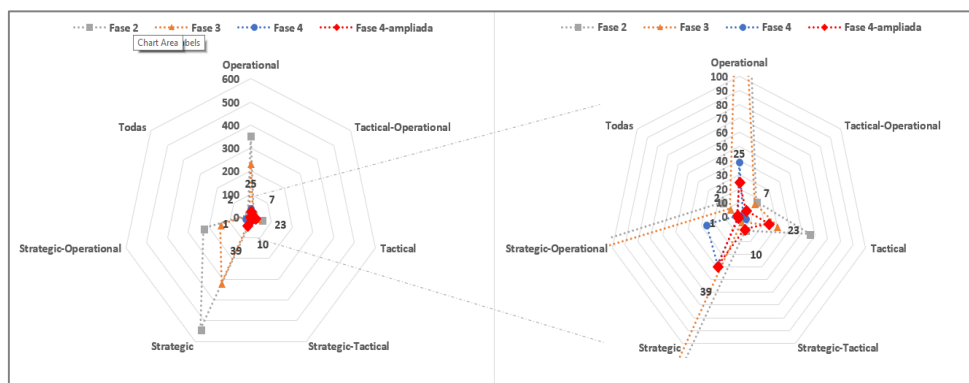


Figura 15. Resultados comparativos de las áreas de clasificación de las tres muestras

En la Tabla 2 se presenta el listado de las revistas que presentan por lo menos dos de los artículos revisados en la muestra final. Estas publicaciones están relacionadas principalmente con investigación en operaciones, ciencias de la decisión, administración y gestión. Las restantes 31 fuentes están referidas en la Tabla 14 y cuentan con un solo artículo publicado. Respecto a la Tabla 2, se puede observar que en el European Journal of Operational Research se publicaron 5 artículos sobre el tema (el de mayor frecuencia), de los cuales 3 se pueden clasificar en el ámbito estratégico, 3 se pueden clasificar en el táctico y uno en el operativo. En total, 19 se clasifican en el ámbito estratégico, 11 en el táctico y 15 en el operativo, conservando la misma tendencia encontrada.

Tabla 2. Listado de revistas y clasificación

Fuente	Documentos	Estratégico	Táctico	Operativo	Total citas
<i>European Journal of Operational Research</i>	5	3	3	1	81
<i>International Journal of Production Economics</i>	3	1	2	1	45
<i>Annals of Operations Research</i>	3		1	3	16
<i>Computers and Industrial Engineering</i>	3	1	-	3	46
<i>Journal of Cleaner Production</i>	3	3	-	-	283
<i>International Journal of Operations and Production Management</i>	3	2	1	1	146
<i>Decision Support Systems</i>	2	2	1	-	204
<i>Managing Service Quality</i>	2	2	-	-	105
<i>Lecture Notes in Business Information Processing</i>	2	2	1	1	4
<i>Computers & Operations Research</i>	2	-	-	2	26
<i>Operations Research for Health Care</i>	2	-	1	2	44
<i>International Journal of Production Research</i>	2	2	-	-	42
<i>IFIP Advances in Information and Communication Technology</i>	2	1	1	1	16
Total	34	19	11	15	1.058

Respecto al número de citas, la de mayor citación es *Journal of Cleaner Production* con 283 citas distribuidas así: 175 del trabajo de Tukker [17], quien presenta una revisión de literatura sobre investigación en el campo de product service systems (PSS) que señala cómo este campo se ha vuelto más prolífico y cómo se ha integrado a una gama más amplia de campos de la ciencia como la fabricación, las TIC, la gestión empresarial y el diseño; 82 citas del estudio de Ceschin [18], quien también presenta una revisión de PSS y su relación con la gestión estratégica; 26 citas del trabajo de Joore y Brezet [19], donde se estudian métodos de diseño en PSS. Estos tres estudios se clasifican principalmente dentro del alcance estratégico de la toma de decisiones.

La segunda revista de mayor citación es *Decision Support Systems* con un total de 204 citas distribuidas entre los trabajos de: Demirkan y Delen [20] (191 citas), quienes presentan una revisión de requisitos para los *Decision Support Systems* (DSS), o sistemas de soporte a la decisión orientados a servicios; y Dong y Srinivasan [21] (13 citas), cuya propuesta establece una estructura de agentes para el desarrollo de un marco que reconozca la necesidad de un diseño basado en la prestación del servicio, para así poder contribuir al desarrollo de DSSs.

En tercer lugar, se ubica la revista *International Journal of Operations and Production Management* con 146 citas, donde Lightfoot et al. [22] y Smith et al. [23] presentan una revisión de contribuciones sobre la servitización y las tendencias a nivel estratégico, mientras que Reim et al. [24] presentan un marco para la toma de decisiones de administración de riesgos en SSME a nivel tanto táctico como operativo.

El cuarto lugar es para la revista *Managing Service Quality* con 105 citas, donde Galvagno y Dalli [25] presentan un estudio sobre la teoría de cocreación de valor, identificando las diferentes perspectivas teóricas y las corrientes de investigación que caracterizan y definen la literatura en el área, principalmente: ciencias del servicio, innovación y gestión de la tecnología y marketing e investigación del consumidor. Este trabajo describe además las implicaciones de las TIC en el servicio [26].

En quinto lugar está el *European Journal of Operational Research* con 81 citas, en el cual se presentan temas tales como: metodologías de toma de decisiones para un sistema de servicio de educación [27]; un método de evaluación de la satisfacción del cliente [28]; un modelo de programación lineal binario para evaluar la sostenibilidad ambiental [29]; una aplicación de asignación de recursos mediante programación entera mixta [30]; y una revisión de literatura sobre programación y ruteo de recursos restringidos [31].

En el nivel estratégico, las revistas con mayor número de artículos son: *European Journal of Operational Research* y *Journal of Cleaner Production*, coincidiendo con el de mayor citación. Para el nivel táctico están el *European Journal of Operational Research* y el *International Journal of Production Economics*. Por último, para el nivel operativo, destacan las revistas *Annals of Operations Research* y *Computers and Industrial Engineering*, publicaciones de métodos de investigación de operaciones e ingeniería industrial donde se presentan herramientas para programación (scheduling), ruteo (routing) y control.

4.3 Clasificación de problemas en la toma de decisiones

En esta sección se lleva a cabo una revisión de cada uno de los niveles jerárquicos en la toma de decisiones de acuerdo con las áreas y tipos de problemas descritos en la Figura 15. En este caso, se describe conceptualmente cada área y problema, y se presenta un análisis de las publicaciones por año, área de conocimiento, tipo de publicación, citas y autores. La toma de decisiones basada en el enfoque jerárquico de la planeación y el control de la producción consiste de una integración vertical entre los objetivos estratégicos, tácticos y operativos de una organización y además establece una relación transversal con las otras áreas funcionales desde el departamento de ventas hasta la

gerencia. Los tres niveles del enfoque jerárquico están relacionados entre sí por el alcance de las decisiones, el cual está caracterizado principalmente por el tiempo, siendo este estratégico a un largo plazo. Estas decisiones subordinan a las decisiones del nivel táctico que son del mediano plazo; a su vez, estas últimas limitan las del nivel operativo, que son de corto plazo. Sin embargo, muchas todas estas decisiones deben tomarse en conjunto evaluando sus efectos e impactos en los tres alcances temporales. En cuanto a los sistemas de servicios, no se posee un enfoque clasificado de esta manera. Por lo tanto, en este documento se identificarán algunos problemas para cada de las categorías: estratégico, táctico, operativo.



Figura 15. Estrategia para la clasificación de la literatura

4.4 Capacidad Problemas de decisión en el nivel estratégico [T3]

La Tabla 3 presenta las principales palabras claves encontradas a nivel estratégico.

Tabla 3. Palabras clave para documentos clasificados en el ambiente estratégico

Palabra clave	Documentos	Palabra clave	Documentos	Palabra clave	Documentos
Service industries	10	Supply chains	3	Hierarchical systems	2
Decision support systems	7	Life cycle	3	Quality management	2
Product-service systems	7	Sustainable development	3	Internet service providers	2
Product design	6	Planning	3	Models	2
Design	5	Research	3	Project management	2
Product-service system (pss)	5	Commerce	3	Life Cycle Assessment (lca)	2
Artificial intelligence	5	Economics	2	Surveys	2
Manufacture	4	Societies and institutions	2	Risk management	2
Industry	4	Service systems	2	Information management	2
Human resource management	4	Curricula	2	Management science	2
Industrial management	4	Scheduling	2	Agriculture	2
Service science	4	Demand chain management	2	Capacity management	2
Sales	4	Supply chain management	2	Transition management	2
or in service industries	4	Strategic planning	2	Knowledge management	2
Benchmarking	3	Resource allocation	2	Critical success factor	2
Innovation	3	Services	2	Environmental impact	2
Integer programming	3	Project scheduling	2	Manufacturing companies	2
Decision making	3	Competition	2	Digital storage	2
Industrial engineering	3	Information technology	2		

A partir de esta clasificación de palabras clave, se observa una gran dispersión en cuanto a las áreas, los campos de aplicación y las técnicas empleadas. En consecuencia, se decide llevar a cabo una nueva clasificación en cuanto al alcance de la decisión de cada uno de los documentos, la cual dio como resultado que las áreas de estrategia, diseño y planeación son las principales tendencias de investigación en los sistemas de servicios. A continuación, se define cada una de estas áreas:

- **Estrategia:** se define con la planeación estratégica, la cual consiste de un proceso explícito que determina los objetivos de un sistema a largo plazo y cómo alcanzarlos mediante una serie de estrategias de menor alcance, la evaluación de estas y un proceso de control [16]. En esta categoría se clasificaron las que incluyen aspectos relevantes para el establecimiento de estrategias en sistemas de servicios: sostenibilidad, innovación y TIC, ...
- **Diseño:** se refiere a un concepto creativo que generalmente se puede entender como una representación que varía dependiendo del campo de concepción. Desde el punto de vista de la SSME, el diseño se refiere a un concepto integrado de producto y proceso [32]. El diseño de servicios es una actividad de organización y planificación de personas, comunicación y componentes para mejorar la calidad del servicio. La experiencia de los clientes se puede entender como una interacción entre el proveedor de servicios y los clientes [33]. Para esta categoría se incluyeron referencias que mencionaran aspectos de diseño de servicio y diseño de productos-servicios (PSS), mediante técnicas como: la ingeniería concurrente, la metodología de despliegue de la función de calidad (Quality Function Deployment- QFD), el diseño de procesos y la teoría de líneas de espera.

- *Planeación*: es un proceso de toma de decisiones en una organización para definir su estrategia (o dirección) y asignar recursos para llevarla a cabo [16]. En esta categoría se incluyeron referencias que mencionaran:
 - *Previsión de la demanda*: mediante métodos de pronóstico como series de tiempo, regresión o métodos causales, etc.
 - *Planeación a largo plazo*: evaluación de proyectos de inversión, análisis de riesgos, lanzamiento de nuevos productos o servicios, técnicas de optimización para la asignación de recursos y técnicas cualitativas para el manejo de recursos y de riesgos, entre otras.

Respecto a las técnicas de modelación se definen las siguientes:

- *Métodos cuantitativos*: en esta categoría se emplean modelos basados en cantidades. En este grupo se suele incluir técnicas basadas en estadística y la investigación de operaciones. Dentro de las primeras se presenta una explicación del comportamiento de alguna variable (o algunas variables) en términos de otra(s) variable(s), mediante estadísticos descriptivos o de inferencia, lo cual se hace necesario debido a la incertidumbre existente en torno a algunos procesos. Por el lado de las técnicas de investigación de operaciones, se encuentran los métodos de optimización clásica, los cuales buscan determinar el valor de unas variables de decisión optimizando una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones operacionales.
- *Métodos cualitativos*: hacen referencia a la utilización de información o características que no se basan en métodos de cuantitativos. Cuando no se puede dar una descripción matemática de las relaciones del sistema, es necesaria la utilización de modelos cualitativos, que en su forma más simple se basan en reglas que hacen uso de los constructores If-Then-Else para describir el comportamiento del proceso. Estas reglas son obtenidas a través de operadores expertos. Dentro de esta categoría están los métodos basados en expertos como el método Delphi, los métodos de panel, el análisis de causalidad y de afinidad, las matrices de impacto, entre otros.

En la Tabla 4 se incluyen las 39 referencias que incluye aspectos de nivel estratégico. De los 39 documentos, 12 se encuentran clasificados también en el aspecto táctico y otros 3 en el operativo. Solo 2 referencias presentan las tres clasificaciones de forma simultánea. Además, de los 39 documentos, 10 son de aplicación, 15 de revisión y 14 teóricos. Por su parte, la Tabla 5 presenta la clasificación de la literatura respecto a las tres áreas de aplicación definidas y el tipo de técnica empleada.

Tabla 4. Información de referencias a nivel estratégico

Tipo de Contribución	Alcance de la decisión		
	Estratégico	Táctico	Operativo
Teórico	14	4	1
Aplicación	10	4	0
Revisión	15	4	2
Total	39	12	3

Tabla 5. Clasificación de la literatura respecto a las áreas de aplicación y tipos de técnicas de solución a nivel estratégico

Observación	Planeación	Diseño	Estrategia	Cualitativos	Cuantitativos
Listado de factores	1	7	12	15	-
Técnicas de calidad	-	-	1	-	1
Valor presente neto, ciclo de vida.	-	1	-	1	1
Simulación	-	1	1	-	1
ahp, fuzzy, programación lineal, qfd	-	1	-	1	1
Listado de factores y procesos	-	-	1	1	-
Balanced scorecard	1	-	1	-	1
Estadística	-	-	1	1	1
Programación lineal entera	1	-	-	-	1
Indicadores kpi	-	1	-	1	1
Diseño concurrente y colaborativo	-	1	-	1	-
Listado de factores, tecnologías de la información.	-	-	2	2	-
Diseño concurrente	-	1	-	1	-
Metodología de diseño	-	1	-	1	-
Six sigma	-	-	1	-	1
Simulación, dinámica de sistemas	1	-	1	-	1
Redes de valor (vna) y modelado de procesos orientado (s-bpm).	1	1	-	1	-
Investigación de operaciones	-	-	-	-	1
Matriced Impacts Croises Multiplication Appliqueeaun Classement (micmac) o Cross Impact Analysis	-	-	-	1	1
Listado de técnicas de un currículo de ssme	1	1	1	1	1
Erp	1	-	-	-	1
Técnicas de ingeniería industrial	2	-	-	2	2
Modelos de planeación	1	1	-	-	1
Total	10	17	22	30	17

En la Figura 16 se observa la distribución de los documentos y sus diferentes intersecciones en lo relacionado con el área y el enfoque del tipo de técnica. La mayoría de los registros hace parte del aspecto de estrategia (22 de 39), seguido de diseño (17) y planeación (10). En cuanto a sus intersecciones, 2 de los documentos presentan las tres áreas, 4 están en planeación-diseño y planeación-estrategia y 6 en estrategia-diseño. En cuanto al tipo de técnica, 30 son cualitativos, 17 cuantitativos y 8 pertenecen a ambos



Figura 16. Distribución de los documentos por área (a) y tipo de técnica (b) del nivel estratégico

En la Figura 17 se observa el tipo de técnica y su intersección. Se evidencia que en la planeación predomina el enfoque cuantitativo, mientras que en el diseño y la estrategia predomina el enfoque cualitativo. Para las intersecciones se encuentra un número bajo en todos los casos. Este resultado identifica una línea de investigación orientada a fortalecer la integración de enfoques cualitativos y cuantitativos en las áreas de diseño y estrategia, desarrollando aplicaciones que involucren métodos cuantitativos en la SSME.



Figura 17. Distribución del tipo de técnica para cada área del nivel estratégico

4.5 Problemas de decisión a nivel táctico

Las principales palabras claves encontradas a nivel táctico se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Palabras clave para documentos clasificados en el ambiente estratégico

Palabra clave	Documentos	Palabra clave	Documentos	Palabra clave	Documentos
Service industries	2	Profitability	1	Game theory	1
Capacity management	2	Global economies	1	Production system	1
Freight markets	1	Shipping industry	1	Fleet sizes	1
Operational availability	1	Product-service systems	1	Serviceization	1
Maintenance	1	Containers	1	Global economics	1
Sales	1	Risk management	1	Simulation approach	1
Theoretical approach	1	Decision support systems	1	Seaborne trade	1
Simulation	1	System availability	1	Models	1
Service capacity	1	Artificial intelligence	1	Service sectors	1
Supply chains	1	Game-theoretical framework	1	Production engineering	1
Demand chain management	1	Availability	1	International trade	1
Service science	1	Performance contracting	1	Industrial management	1
Performance-based contracting	1	Change management	1	Economics	1
Industry	1	Repairable inventory	1	Repair	1
Business activities	1	Manufacturing industries	1		

Para esta clasificación, se observa una dispersión de palabras clave mayor; solo service industries y capacity management se repiten con una frecuencia de 2. Por lo tanto, se decide realizar una clasificación de literatura en cuanto a áreas de aplicación (planeación de capacidades y dimensionamiento) y tipo de técnicas empleadas (optimización, heurísticas, cualitativo, económico y otras). A continuación, se define cada una de estas áreas:

- *Planeación de capacidades:* su objetivo es alcanzar un nivel óptimo donde las capacidades de producción satisfagan la demanda [16], [34]. Las necesidades de capacidad incluyen equipamiento, espacio y habilidades de los empleados. La capacidad se refiere al potencial de un sistema para producir bienes o prestar servicios durante un intervalo de tiempo específico; su planificación implica consideraciones a corto y largo plazo. Las consideraciones a largo plazo se relacionan con el nivel estratégico de capacidad, mientras que las de corto plazo se relacionan con las variaciones en los requisitos de capacidad debido a fluctuaciones estacionales, aleatorias e irregulares en la demanda.
- *Dimensionamiento:* referente a las decisiones de capacidad dentro de una empresa, las cuales son importantes debido a que permiten determinar el límite de producción y proporcionan una visión para determinar los costos de operación. Las decisiones básicas sobre la capacidad a menudo tienen consecuencias a largo plazo. Una de las

decisiones más importantes es encontrar un balance entre el suministro a largo y mediano plazo y las capacidades de una organización y el nivel previsto de demanda a largo y mediano plazo. Las organizaciones también deben planificar los cambios reales en la capacidad, los cambios en los deseos y la demanda del consumidor, la tecnología e incluso el ambiente.

Al evaluar alternativas en la planificación de capacidad, los analistas deben considerar aspectos cualitativos y cuantitativos del negocio que involucran factores económicos, ambientales, sociales e incluso personales. Algunos de los determinantes de la capacidad son:

- *Instalaciones:* el tamaño y la provisión para la expansión son clave en el diseño de las instalaciones; otras variables que incluyen factores de ubicación (costos de transporte, distancia al mercado, suministro de mano de obra, fuentes de energía, entre otras).
- *Factores del producto y del servicio:* cuanto más uniforme sea el resultado, más oportunidades hay para la estandarización de métodos y materiales; esto conduce a una mayor capacidad. En los servicios la estandarización es generalmente baja, por lo tanto, es más complicado mediar la capacidad.
- *Factores del proceso:* la cantidad de producción es un determinante importante de la capacidad, así como también lo es la calidad del producto. Si la calidad no cumple con los estándares, la tasa de producción disminuye debido a la necesidad de actividades de inspección y re trabajo. Las mejoras en los procesos que aumentan la calidad y la productividad pueden dar como resultado un aumento de la capacidad.
- *Factores humanos:* las tareas requeridas en ciertos trabajos, la variedad de actividades involucradas, la capacitación, la habilidad y la experiencia afectan la producción potencial y real. La motivación de los empleados, el ausentismo y la rotación laboral también influyen en la tasa de producción.
- *Factores de política:* la política de gestión puede afectar la capacidad al permitir o no opciones de capacidad, como horas extras o turnos.
- *Factores operativos:* los problemas de programación pueden ocurrir cuando una organización tiene diferencias en las capacidades de los equipos o en los requisitos del trabajo. Otras áreas de impacto en la capacidad efectiva incluyen: decisiones de inventario, entregas tardías, requisitos de compra, aceptabilidad de materiales y piezas compradas y procedimientos de inspección y control de calidad.
- *Factores de la cadena de suministro:* las preguntas incluyen: ¿qué impacto tendrán los cambios en los proveedores, el almacenamiento, el transporte y los distribuidores? Si se aumenta la capacidad, ¿podrán estos elementos de la cadena de suministro manejar el aumento? Si se quiere disminuir la capacidad, ¿qué impacto tendrá la pérdida de negocios en estos elementos de la cadena de suministro?
- *Factores externos:* los estándares mínimos de calidad y de desempeño pueden restringir las opciones de la administración para aumentar y usar la capacidad.

Una planificación inadecuada puede ser una importante limitación para la determinación de la capacidad. Los factores más importantes de la capacidad efectiva son los procesos y los factores humanos. Los factores de proceso deben ser eficientes y funcionar sin problemas, de lo contrario, la tasa de producción disminuirá drásticamente. Por su parte, los factores humanos deben estar bien entrenados y contar con experiencia relacionada, además de estar motivados y presentar bajos niveles de ausentismo y rotación laboral. Respecto a las técnicas de solución, a continuación, se definen aquellas utilizadas en el presente trabajo:

- *Optimización:* se refiere a los métodos cuantitativos de la investigación de operaciones, los cuales se basan principalmente en métodos de programación lineal que buscan determinar las asignaciones de recursos mediante la optimización de una función objetivo [16]. La planeación agregada es un ejemplo clásico de este tipo de decisiones modeladas mediante optimización, como puede observarse en los trabajos de Méndez [16] y Xing et al. [35].
- *Heurística:* procedimiento sistemático que permite llegar a una muy buena solución (pero no óptima) en un tiempo limitado. Esta comprende algoritmos de exploración en los que las soluciones se hallan mediante la evaluación de la búsqueda de un resultado final, a través de una serie de pasos organizados.
- *Económico:* se basa principalmente en las matemáticas financieras, las cuales determinan la viabilidad, factibilidad y sostenibilidad de una decisión. Herramientas como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), los puntos de equilibrio, entre otras, permiten evaluar decisiones de capacidades, su ampliación y el dimensionamiento de sistemas.

- *Otras*: Dentro de esta categoría se clasifican técnicas relacionadas con la utilización de otro tipo de modelación, como los modelos cualitativos, el análisis de riesgos, los modelos de procesos, tiempos y movimientos, la simulación, etc.

Alternativamente, el uso de algoritmos para el procesamiento de datos puede ser aplicado para la obtención de reglas descriptivas más adecuadas sobre el sistema; por ejemplo, la utilización de conjuntos difusos que contienen un álgebra y un conjunto de lingüística que facilita la descripción de los sistemas complejos y con incertidumbre. Esta técnica combina elementos de los modelos basados en reglas, aproximaciones probabilísticas y conjuntos de símbolos [27], [36], [37]. La Tabla 7 incorpora 23 referencias clasificadas respecto al nivel táctico. De los 23 documentos clasificados en este nivel, 12 están clasificados también en el aspecto táctico y 9 más en el operativo. A diferencia del enfoque estratégico, este nivel tiene más relación con los demás niveles. Solo 2 referencias presentan las tres clasificaciones de forma simultánea.

Tabla 7. Información de referencias a nivel táctico

Tipo de Contribución	Alcance de la decisión		
	Estratégico	Táctico	Operativo
Teórico	4	9	3
Aplicación	4	9	3
Revisión	4	5	3
Total	12	23	9

En la Tabla 8 se presenta la clasificación de los documentos respecto a las áreas de aplicación definidas y los tipos de técnicas en el nivel táctico de la toma de decisiones.

Tabla 8. Clasificación de la literatura respecto a las áreas de aplicación y tipos de técnicas de solución a nivel táctico

Agrupación	Planeación capacidades	Dimensionamiento	Optimización	Heurísticas	Económico	Otras
Análisis cualitativo	1	1	-	-	-	1
Técnicas de calidad	-	1	-	-	-	1
Análisis de riesgo	2	1	-	-	2	1
Listado de factores	1	1	-	-	-	2
<i>Balanced scorecard</i>	1	-	-	-	1	-
Modelo de costos basado en actividades y programación entera	1	1	1	-	1	-
Basado en expertos e incertidumbre (<i>Fuzzy Delphi, Fuzzy Analytical Hierarchy Process-ahp</i>)	1	1	-	-	-	1
Teoría de juegos	1	-	-	-	-	1
Programación lineal entera	1	1	1	-	-	-
<i>Renew management</i>	-	1	-	1	1	-
Listado de factores, tecnologías de la información	1	-	-	-	-	1
Modelo empírico basado en Reglas	-	1	-	1	-	-
Redes de valor (vna) y modelado de procesos de negocio orientado a materias (s-bpm).	-	1	-	-	-	1
Simulación, Dinámica de Sistemas	1	-	-	-	-	1
Simulación	-	1	-	-	-	1
Teorías de colas, cadenas de Márkov, procesos estocásticos, programación dinámica.	1	1	-	-	-	1
<i>Matriced Impacts Croises Multiplication Appliquee a un Classement or Cross Impact Analysis</i>	1	-	-	1	-	-
Gestión de operaciones	1	1	1	1	1	1
Métodos y tiempos	-	1	-	-	-	1
Modelos de localización y de planeación de capacidades	1	1	1	-	-	1
Simulación, teoría de colas	1	1	-	-	-	1
Total	16	16	4	4	6	16

En la Figura 18 se observa la distribución de los documentos en la clasificación de tipo de área y tipo de técnica empleada, así como sus diferentes intersecciones. La planeación de capacidades y el dimensionamiento presenta la misma proporción de 16 documentos cada uno y su intersección es de 9 documentos. En cuanto al tipo de técnica, 4 corresponden a optimización, 4 a heurísticas, 6 a económico y 16 a otras. Este resultado muestra que en los servicios se emplean técnicas de optimización y heurísticas diferentes a las de los sistemas de manufactura.

En cuanto a las intersecciones, se observa que todas las posibilidades tienen al menos un documento, demostrando la tendencia a la integración de diferentes enfoques para la toma de decisiones. Las de mayor valor (2) son las intersecciones optimización-otras, optimización-económico, económico-otras y económico-heurísticas. Evidenciando la importancia del factor económico para las decisiones tácticas y su integración con los demás tipos de técnicas. Por otro lado, la Figura 19 presenta la clasificación de los tipos de técnicas para cada área por separado. En este caso no se encuentran grandes diferencias en la distribución entre las dos áreas.

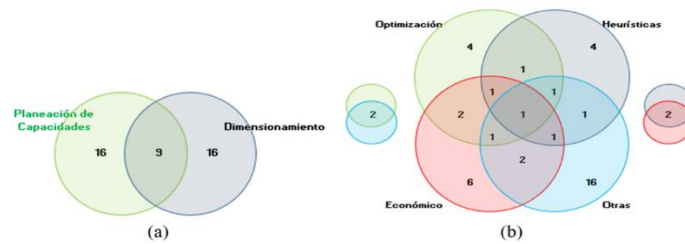


Figura 18. Distribución de los documentos por área (a) y tipo de técnica (b) en el nivel táctico

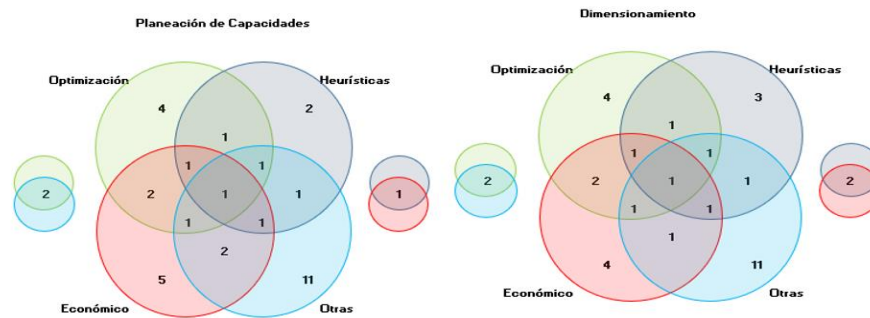


Figura 19. Clasificación de los documentos por tipo de técnica para la planeación de capacidades (a) y dimensionamiento (b) para el nivel táctico.

La Tabla 9 contiene el registro de las principales palabras claves encontradas a nivel táctico.

Tabla 9. Palabras clave para documentos clasificados en el ambiente estratégico

Palabra clave	Docus	Palabra clave	Docus	Palabra clave	Docus
Service industries	8	Integer programming	3	Economics	2
Product-service systems	6	Manufacture	3	Innovation	2
Decision support systems	5	Life cycle	3	Scheduling	2
Human resource management	4	Commerce	3	Capacity management	2
Sales	4	Service science	3	Sustainable development	2
OR in service industries	4	Quality management	2	Project management	2
Benchmarking	3	Life cycle assessment (LCA)	2	Models	2
Industry	3	Project scheduling	2	Critical success factor	2
Artificial intelligence	3	Industrial engineering	2	Risk management	2
Supply chains	3	Planning	2	Knowledge management	2
Product service system (PSS)	3	Surveys	2	Strategic planning	2
Industrial management	3	Environmental impact	2	Demand chain management	2
Product design	3	Internet service providers	2	Service systems	2
Research	3	Decision making	2		

De la clasificación se evidenció una gran dispersión en cuanto a las áreas, campos de aplicación y técnicas; sin embargo, se encuentran relacionadas con palabras de ciencias de los servicios e investigación de operaciones. Por ende, se decide realizar una clasificación del alcance de la decisión de cada uno de los documentos: programación, ruteo, personal y control. A continuación, se define cada uno de estos:

- **Programación:** trata sobre la asignación de recursos limitados a ciertas tareas u operaciones en un periodo definido [38]–[40], con el fin de optimizar una o más medidas de desempeño. La programación de tareas es un problema frecuente en los sistemas de producción, donde la toma de decisiones con respecto a la mejor asignación de recursos es un factor crítico. Como plantean Pinedo et al. [40], los principales problemas de programación de tareas en sistemas de servicios pueden clasificarse como:
 - **Scheduling en proyectos:** relacionado con la gestión de recursos y la secuenciación de tareas en proyectos como construcciones, procesos de desarrollo, inversiones, etc.
 - **Scheduling en fuerza de trabajo:** concerniente al establecimiento de horarios y turnos de trabajo.
 - **Horarios, reservaciones y citas:** se refiere a la programación de horarios en escuelas y universidades, donde la cantidad de variables a considerar hace difícil el desarrollo manual de estas actividades; también en el sector turismo y de salud, con el manejo de reservaciones y de citas, respectivamente.
 - **Scheduling en transporte:** problemas de ruteo de vehículos y sus aplicaciones en logística.
 - **Scheduling en entretenimiento:** afín al desarrollo de itinerarios de grandes competiciones como el mundial de fútbol y ligas deportivas, así como a decisiones como la asignación de estadios y jueces a los partidos, donde múltiples restricciones deben satisfacerse.

- *Ruteo*: el problema de ruteo de vehículos (vehicle routing problem-VRP) consiste en determinar las rutas que utilizará una flota de vehículos para visitar un conjunto de clientes geográficamente distribuidos. Es uno de los problemas de optimización combinatoria más estudiados [41]. Su origen es relacionado con el Travelling Salesman Problem (TSP) [42]. Algunas de las variantes de los VRP son:
 - *Problema de ruteo con capacidad (CVRP)*: donde la flota de vehículos tiene una capacidad limitada.
 - *Problema de ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW)*: donde cada cliente tiene un horario en el cual puede ser visitado.
 - *Problema de ruteo de vehículos con recibo (VRPB)*: se divide la flota de vehículos en aquellos que reciben y entregan bienes en los puntos.
 - *Problema de ruteo de vehículos recogiendo y entregando simultáneamente (VRPSD)*: el vehículo que visita el punto puede tanto recibir como recoger bienes.
 - *Problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MD-VRP)*: los vehículos parten de distintos depósitos y pueden terminar en cualquiera de ellos.
- *Personal*: trata sobre el problema de programación de personal (workforce scheduling), el cual tiene que ver con encontrar un horario para la asignación de personas en intervalos de tiempo que satisfagan la demanda de personal y a la vez tenga en cuenta todas las demás restricciones. Lo más frecuente es que se optimice una función de costos [40], [43].
- *Control*: hace referencia a las actividades operacionales relacionadas con el seguimiento de los programas establecidos y tiene como principal característica que debe ejecutarse en línea (on line) con las operaciones; por ende, su complejidad es mayor [34]. Es frecuente conocerlo como reprogramación, la cual consiste en la corrección de estándares y la actualización de los programas de actividades.

En cuanto al tipo de técnica utilizada, las variables encontradas se clasifican en: optimización, modelos estocásticos, heurísticas-metaheurísticas y otras. A continuación, cada una de estas categorías es definida:

- *Optimización*: garantiza el valor óptimo de la solución, habitualmente consta de un consumo computacional muy elevado, por lo que resulta adecuado para instancias pequeñas del problema. Pinedo [44] clasifica los métodos como aplicaciones de programación lineal, programación dinámica y ramificación y poda (branch and bound). Algunas de las ventajas de estos métodos son la optimalidad de la solución y la existencia de paquetes computacionales que los resuelven de manera adecuada. Sin embargo, su principal desventaja es el alcance que tienen para problemas de menor tamaño, además de las dificultades propias de las técnicas de divisibilidad, es decir, se pueden tener soluciones donde una sola tarea puede ser fraccionada en el tiempo, tal como plantea Méndez-Giraldo [39].
- *Modelos estocásticos*: dentro de los modelos estocásticos para el análisis de sistemas de servicios se encuentra la teoría de colas, la cual estudia los sistemas donde se configura una línea de espera en el momento en que un cliente llega a una instalación en búsqueda de un servicio y se forma una cola o línea de espera [34], [45]. Dependiendo del propósito de la modelación de la red de colas, la técnica de solución es seleccionada siguiendo como criterio la precisión del resultado esperado respecto a los supuestos de funcionamiento del sistema. Dado que la terminología utilizada para clasificar los métodos de análisis no es precisa, Baldwin et al. [46] proponen una clasificación en dos (2) tipos: exactos y aproximados. Dentro de las técnicas de análisis clasificadas como exactas, se identifican las redes de Jackson y las redes BCMP.

Por otro lado, dentro de esta categoría se incluye también la simulación, considerada una técnica de la investigación de operaciones empleada para representar sistemas en un entorno computacional con el fin de experimentar [39]. Incluye el diseño y desarrollo para representar el sistema, y tiene como objetivo entender y predecir su comportamiento a lo largo del tiempo. Con respecto a programación de tareas, básicamente se ha hecho uso de dos enfoques de modelos de simulación: discreta y multi agentes.

La simulación discreta se ha empleado para representar y explicar el flujo de los recursos en un proceso de producción y servicios caracterizados por la existencia de colas y acumulaciones en estaciones de trabajo, donde la función de programación de tareas juega un rol importante en la armonización de estos flujos [39]. Por su parte, la simulación basada en agentes ha sido utilizada para explicar el comportamiento de los recursos, así como su interacción con los medios de producción y con otros recursos [47].

- *Heurísticas-Metaheurísticas (h-Mh)*: las heurísticas son métodos que realizan una búsqueda limitada del espacio de soluciones. Adicionalmente, las heurísticas se pueden utilizar fácilmente para considerar la diversidad de restricciones encontradas en contextos de la vida real [48]. Por otro lado, las metaheurísticas son algoritmos aproximados de optimización y metodologías de búsqueda de propósito general [49] que parten de una solución

factible inicial (obtenida frecuentemente con otra heurística) y van iterando otras soluciones factibles de su entorno mediante alteraciones de la solución, con lo cual almacenan la mejor hasta que se cumpla un criterio de parada. Algunas de las principales metaheurísticas usadas en problemas de programación de tareas son:

- Recocido simulado (simulated annealing)
 - Greedy randomized adaptative search procedures (GRASP)
 - Búsqueda tabú (tabu search)
 - Algoritmo genético (genetic algorithm)
 - Colonia de hormigas (ant colony)
 - Particle swarm optimization (PSO)
- *Otras:* Aquí se incluyen otras técnicas diferentes a las ya mencionadas. Dentro de esta, es importante mencionar la inteligencia artificial como parte de las ciencias computacionales [50], la cual es una ciencia multidisciplinaria basada en la economía, la neurociencia, la psicología, la computación y la teoría de control. Algunos de los principales métodos empleados por el enfoque propio de otras técnicas son: lógica difusa, redes neuronales, autómatas celulares, sistemas multiagente, inteligencia colectiva, sistemas basados en conocimiento, sistemas cooperativos y sistemas expertos.

Las tecnologías basadas en agentes proveen una forma para contextualizar sistemas complejos y dinámicos, así como comprender la interacción social de entidades independientes actuando, aprendiendo y evolucionando de manera separada, en respuesta a interacciones y estímulos de su ambiente local [51]. Los agentes pueden ser caracterizados de acuerdo con los “atributos o propiedades que posean frente a la resolución de un determinado problema” [52, p.96]. Los sistemas multiagente han sido utilizados durante los últimos años para realizar el ruteo de vehículos [53] y la programación de tareas en diferentes industrias, tanto de manufactura como de servicios [54], [55]. Al explotar las características de los agentes se puede realizar planeación en tiempo real. Lo anterior se lleva a cabo en tiempos de computación razonables y la calidad de las soluciones alcanzadas por este método es comparable con las soluciones arrojadas por los métodos tradicionales [56].

Los sistemas expertos constituyen otro método, el cual, mediante una base de conocimiento, motores de inferencia computacional y una interfaz de usuario, los sistemas expertos pueden simular el proceso de aprendizaje, memorización, razonamiento y comunicación de un ser humano experto en el tema [57]–[59]. Este método se traduce en un robusto programa computacional que puede apoyar las decisiones de programación en ambientes de manufactura y de servicios [57].

En la Tabla 10 se presentan las 25 referencias clasificadas respecto al nivel operativo. De los 25 documentos clasificados en este nivel, 3 están clasificados también en el aspecto estratégico y 9 en el táctico. A diferencia del enfoque estratégico y el táctico, este nivel tiene más relación con el nivel táctico, debido en gran parte a la importancia de decisiones en el mediano plazo que lo pueden afectar en cuanto a capacidad. Solo 2 referencias presentan las tres clasificaciones de forma simultánea.

Tabla 300. Información de referencias a nivel operativo

Tipo de Contribución	Alcance de la decisión		
	Estratégico	Táctico	Operativo
Teórico	1	3	3
Aplicación	0	3	8
Revisión	2	3	14
Total	3	9	25

En la Tabla 11 se presenta la clasificación de los documentos respecto a los problemas definidos y los tipos de técnicas de solución en el nivel operativo de la toma de decisiones. Además, en la Figura 25 se observa la distribución de los documentos respecto al tipo de problema y del tipo de técnica empleada, así como sus diferentes intersecciones.

Al respecto, el problema con mayor frecuencia es programación, con un total de 16 documentos, seguido de personal (14), ruteo (13) y control (6). En cuanto a las intersecciones, se observa que la de mayor frecuencia es programación-personal (9), seguida de ruteo-personal (8) y programación-ruteo (7). Estas intersecciones representan la importancia del factor humano en los programas de decisión a nivel operativo en los sistemas de servicios, donde el uso de personas para la prestación de servicios es una característica permanente.

Por ende, tanto las decisiones de programación como de ruteo tienen relación con este aspecto, lo cual se evidencia en la siguiente intersección con 5 documentos sobre programación-ruteo-personal. Otra intersección con 5 documentos es programación-control, la cual muestra la importancia en el seguimiento de las decisiones en línea. Así mismo, la intersección personal-control se hace presente en 5 documentos. Las demás intersecciones reportan una frecuencia de 2 documentos; sin embargo, es importante resaltar que están presentes en todas las posibilidades, lo cual indica una relevancia importante en los problemas de toma de decisiones en los sistemas de servicios.

Tabla 311. Clasificación de la literatura respecto a las áreas de aplicación y tipos de técnicas de solución a nivel operativo

Técnica	Área							
	Program	Ruteo	Personal	Control	Optimiza	Estocástic	Heuristic -metaheu	Otras
Análisis de riesgos	1	0	1	2	0	0	0	2
Modelo empírico basado en reglas	0	1	0	0	0	0	0	1
Revisión de técnicas de <i>scheduling</i>	1	1	1	0	1	1	1	0
Investigación de operaciones	1	2	1	1	1	1	1	0
Simulación	1	0	0	0	0	0	0	1
Teorías de colas, cadenas de markov, procesos estocásticos, prog. dinámica.	1	1	1	1	0	1	0	0
Gestión de operaciones	1	0	1	0	1	1	1	0
Métodos y tiempos	1	0	1	0	0	0	0	1
Programación lineal entera	2	1	2	0	2	0	0	0
Programación lineal entera, heurísticas	0	1	1	0	1	0	1	0
Teoría de colas, metaheurísticas, pl	0	0	1	0	1	1	1	0
Métodos de solución para hhc	0	2	2	0	2	1	2	0
Métodos de solución para vrp	0	1	0	0	1	1	1	0
Métodos de solución vrp dinámico	0	0	0	0	1	1	1	0
Métodos de solución para ruteo y programación	2	2	0	0	2	2	2	0
Simulación, teoría de Colas	1	0	1	0	0	1	1	0
Sistemas multiagente, pso, aco	1	0	0	0	0	0	1	1
Agentes inteligentes	1	0	0	1	0	0	0	1
Teoría de colas, progra. dinámica	1	0	0	1	1	1	0	0
Sistemas expertos, programación lineal, heurísticas de <i>clustering</i> , aco	1	1	1	0	1	0	1	1

En cuanto a las técnicas de solución empleadas en el ambiente operativo, se observa en la Figura 20 (b) la clasificación de los documentos. La de mayor frecuencia es heurísticas y metaheurísticas (H-MH) con 16 documentos, seguida de Optimización con 15, luego esta modelos estocásticos con 12 y por último otras con un total de 8. Por su parte, se observa que la intersección de mayor frecuencia es Optimización-H-MH con 12 documentos, seguida de Optimización-Mod. Estocásticos y Mod. Estocásticos-H-MH, cada una con 10. Seguido, se encuentra Optimización-Mod. Estocásticos-H-MH con 9 documentos, seguida de H-MH-Otras con 4, y Optimización-Otras y Optimización-H-MH-Otras con 1 documento cada una. Par las demás intersecciones no se encuentran coincidencias.

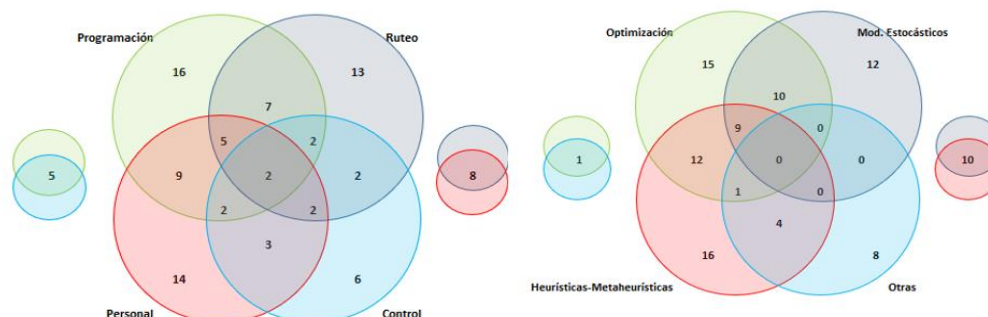


Figura 20. Distribución de los documentos en cuanto a problema (a) y tipo de técnica (b) del nivel operativo

Estos resultados permiten concluir que aunque la optimización es el método clásico para resolver este tipo de problemas, debido a la complejidad de los mismos, es necesaria la utilización de técnicas aproximadas, tal como las clasificadas en H-Mh. Adicionalmente, en los sistemas de servicios es necesario incluir aspectos como la incertidumbre, haciendo necesari el uso métodos estocasticos. Por lo anterior, estas intersecciones son las que se presentan con mayor frecuencia.

Por otro lado, en la revisión efectuada no se encontraron métodos que integraran todas las categorías planteadas, o aquellas que incluyeran las metodologías categorizadas como otras, lo cual permite establecer la necesidad de explorar estos métodos con el fin de determinar si pueden ofrecer métodos alternativos de solución o mejorar los resultados en términos de calidad y rapidez.

La Figura 20 muestra la clasificación de las técnicas de solución para cada tipo de problema. Para los problemas de programación, ruteo y personal, las técnicas con mayor frecuencia de uso son H-MH, Optimización y Mod. Estocásticos, junto con sus principales intersecciones. De otro lado, para el problema de control las más utilizadas son las clasificadas como otras. Este resultado sugiere que el problema de control se ha manejado de forma independiente a los otros tipos de problemas, por lo que al tener como principal característica la necesidad de control on-line este es abordado con metodologías no tradicionales.

5. CONCLUSIONES

Este estudio llevó a cabo un análisis sobre la toma de decisiones en la ingeniería de servicios, disciplina que hace parte de un campo de conocimiento llamado ciencia e ingeniería de sistemas de servicios, el cual consiste de una integración multidisciplinaria para el estudio, análisis, diseño, gestión y optimización de los sistemas de servicios. Este es un campo estrechamente relacionado con la ingeniería industrial, debido a que abarca una diversidad de enfoques para la administración de dichos sistemas.

El análisis efectuado se enfocó en el proceso de toma de decisiones en el marco del enfoque jerárquico, el cual establece tres niveles. El primer de ellos corresponde a lo estratégico. Para este nivel se encontró que los problemas de decisión para los sistemas de servicios están relacionados principalmente con el diseño, la estrategia y la planeación, siendo el diseño y la estrategia los de mayor importancia. En este aspecto, se identifica como posible área de estudio la inclusión de métodos cuantitativos en estas disciplinas de investigación, con lo cual se espera propiciar una mayor robustez en la toma de decisiones.

El segundo nivel corresponde al nivel táctico. Frente a este, se encontró que la cantidad de trabajos es inferior debido a que en varios estudios esta área se clasifica dentro del nivel estratégico u operativo. Además, se evidencia que existe la misma proporción en cuanto a las dos áreas definidas. Respecto a las técnicas de toma de decisiones en este nivel, se encontró que la mayoría fueron clasificadas en una categoría donde se incluían técnicas cualitativas, de simulación, de teoría de colas, de análisis de riesgos y de gestión de la calidad, lo cual permiten evidenciar una diferencia significativa con los sistemas de manufactura, donde predominan las técnicas cuantitativas de optimización y heurísticas. Adicionalmente, se pone de manifiesto la importancia de las técnicas de análisis económico, debido a que las decisiones de dimensionamiento y de capacidad en los sistemas de servicios son evaluadas a través de estos criterios, principalmente. Como posible área de investigación se identifica la necesidad de definir específicamente el alcance de este tipo de decisiones, así como las técnicas utilizadas, puesto que se evidencia una diferencia marcada respecto a los sistemas de manufactura.

En el tercer nivel se encuentran los aspectos operativos de la toma de decisiones, los cuales se caracterizan por tener un alcance de corto plazo. En este nivel se encontraron varios trabajos de aplicación y de revisión que permiten evidenciar una tendencia importante de investigación en esta área. Los problemas identificados fueron clasificados en las categorías de programación, ruteo, personal y control, concluyendo que los principales problemas son los de programación, personal y ruteo, junto con las intersecciones de estos tres. Este aspecto evidencia la complejidad de las decisiones en este nivel, debido a que cada uno de los problemas de forma independiente se caracteriza por tener una gran cantidad de variables y restricciones, las cuales deben ser satisfechas de forma simultánea en aras de garantizar una solución factible al problema. Además, se encontró que el esfuerzo incrementa cuando se busca una optimalidad, por lo que se recurre principalmente a métodos de aproximación con heurísticas y metaheurísticas, como pudo comprobarse a través de los resultados obtenidos.

Respecto al control, se encontró una menor proporción de trabajos relacionados. Entre los estudios revisados se observó una mayor utilización de técnicas no tradicionales como el análisis de riesgos, la simulación y los agentes, las cuales permiten agregar la característica de autonomía para responder a la necesidad de reprogramación, que es la segunda tendencia identificada en este nivel de decisión.

Del trabajo realizado se pudo establecer un primer acercamiento al proceso de toma de decisiones en los sistemas de servicios, identificando diferencias y similitudes con los enfoques utilizados en manufactura y permitiendo establecer algunas áreas de investigación que pueden ser exploradas para el desarrollo de nuevo conocimiento, con lo que se espera incrementar la competitividad de los sistemas de servicios.

REFERENCIAS

- [1] E. R. López-Santana y G. A. Méndez-Giraldo, "A Knowledge-Based Expert System for Scheduling in Services Systems", In Proc. Workshop on Engineering Applications, 2016, pp. 212-224.
- [2] E. R. Lopez-Santana, S. J. B. Castro y G. A. M. Giraldo, "Modelo metodológico para programación de tareas en sistemas de servicios: un enfoque de ingeniería de software", *Redes Ing.*, vol. 7, no. 1, pp. 55-66, 2016.
- [3] G. Motta, T. Barroero y G. Pignatelli, "SSME Curricula: An Overview", *Physics Procedia*, Vol. 33, pp. 228-235, 2012.
- [4] P. P. Maglio, S. Srinivasan, J. T. Kreulen y J. Spohrer, "Service systems, service scientists, SSME, and innovation" *Commun. ACM*, vol. 49, no. 7, pp. 81, 2006.
- [5] J. Spohrer, P. P. Maglio, J. Bailey y D. Gruhl, "Steps toward a science of service systems", *Computer (Long Beach, Calif.)*, vol. 40, no. 1, pp. 71-77, 2007.
- [6] H. Demirkan, J. C. Spohrer y V. Krishna, "Introduction of the Science of Service Systems," in *The Science of Service Systems*, H. Demirkan, J. C. Spohrer, and V. Krishna, Eds. Boston, MA: Springer US, pp. 1-11, 2011.
- [7] Á. Martínez y P. Lázaro, "La Ciencia de los Servicios: un nuevo enfoque para la innovación en compañías de servicios", *Universia Business Review*, no. 15, pp. 120-127, 2007.
- [8] J. C. Spohrer, H. Demirkan y V. Krishna, "Service and Science", *the Science of Service Systems Springer*, pp. 325-358, 2011.

- [9] M. L. Pinedo, "Service Models", in *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, Springer New York, pp. 37-49, 2009.
- [10] S. I. Gass y M. C. Fu, Eds., "Service Systems", in *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Springer US, pp. 1392-1392, 2013.
- [11] S. L. Vargo y R. F. Lusch, "Service-dominant logic: Continuing the evolution", *Journal of the Academy of Marketing Science*, vol. 36, no. 1, pp. 1-10, 2008.
- [12] S. L. Vargo y R. F. Lusch, Why "service"?, *Journal of the Academy of Marketing Science*, vol. 36, no. 1, pp. 25-38, 2008.
- [13] D. Ing, "Service Systems in Changing Paradigms; An Inquiry Through the Systems Science", in *The Science of Service Systems*, H. Demirkan, J. C. Spohrer y V. Krishna, Eds. Springer US, pp. 267-296, 2011.
- [14] A. Polyvyanyy y M. Weske, "Flexible Service Systems", in *The Science of Service Systems*, H. Demirkan, J. C. Spohrer y V. Krishna, Eds. Springer US, pp. 73-90, 2011.
- [15] G. S. Bhatnagar, H. Prasad y L. Prashanth, "Service Systems", in *Stochastic Recursive Algorithms for Optimization*, Springer London, pp. 225-241, 2013.
- [16] G. Méndez, "Gerencia de manufactura Función de planeación", 1a ed., Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2003.
- [17] A. Tukker, "Product services for a resource-efficient and circular economy – a review", *Journal of Cleaner Production*, vol. 97, pp. 76-91, 2015.
- [18] F. Ceschin, "Critical factors for implementing and diffusing sustainable product-Service systems: Insights from innovation studies and companies' experiences", *Journal of Cleaner Production*, vol. 45, pp. 74-88, 2013.
- [19] P. Joore y H. Brezet, "A Multilevel Design Model: The mutual relationship between product-service system development and societal change processes", *Journal of Cleaner Production*, vol. 97, pp. 92-105, 2015.
- [20] H. Demirkan y D. Delen, "Leveraging the capabilities of service-oriented decision support systems: Putting analytics and big data in cloud", *Decision Support Systems*, vol. 55, no. 1, pp. 412-421, 2013.
- [21] C.-S. J. Dong y A. Srinivasan, "Agent-enabled service-oriented decision support systems", *Decision Support Systems*, vol. 55, no. 1, pp. 364-373, 2013.
- [22] H. Lightfoot, T. Baines y P. Smart, "The servitization of manufacturing: A systematic literature review of interdependent trends", *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 33, no. 11, pp. 1408-1434, 2013.
- [23] L. Smith, R. Maull y I. C. L. Ng, "Servitization and operations management: A service dominant-logic approach", *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 34, no. 2, pp. 242-269, 2014.
- [24] W. Reim, V. Parida y D. R. Sjodin, "Risk management for product-service system operation", *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 36, no. 6, pp. 665-686, 2016.
- [25] M. Galvagno y D. Dalli, "Theory of value co-creation: A systematic literature review", *Managing Service Quality*, vol. 24, no. 6, pp. 643-683, 2014.
- [26] C. F. Breidbach, R. Brodie y L. Hollebeek, "Beyond virtuality: From engagement platforms to engagement ecosystems", *Managing Service Quality*, vol. 24, no. 6, pp. 592-611, 2014.
- [27] K. Kamvysi, K. Gotzamani, A. Andronikidis y A. C. Georgiou, "Capturing and prioritizing students' requirements for course design by embedding Fuzzy-AHP and linear programming in QFD", *European Journal of Operational Research*, vol. 237, no. 3, pp. 1083-1094, 2014.
- [28] J.-N. Pan y H. T. N. Nguyen, "Achieving customer satisfaction through product-service systems", *European Journal of Operational Research*, vol. 247, no. 1, pp. 179-190, 2015.
- [29] W.-H. Tsai, C.-H. Yang, J.-C. Chang y H.-L. Lee, "An Activity-Based Costing decision model for life cycle assessment in green building projects", *European Journal of Operational Research*, vol. 238, no. 2, pp. 607-619, 2014.
- [30] M. D. Dean y S. K. Nair, "Mass-casualty triage: Distribution of victims to multiple hospitals using the SAVE model", *European Journal of Operational Research*, vol. 238, no. 1, pp. 363-373, 2014.
- [31] D. C. Paraskevopoulos, G. Laporte, P. P. Repoussis y C. D. Tarantilis, "Resource constrained routing and scheduling: Review and research prospects", *European Journal of Operational Research*, vol. 263, no. 3, pp. 737-754, 2017.
- [32] J. H. Heizer y B. Render, "Principles of operations management", Boston: Pearson Education, 2010.
- [33] C. Voss y J. Hsuan, "Service Science; The Opportunity to Re-think What We Know About Service Design", in *The Science of Service System*, H. Demirkan, J. C. Spohrer y V. Krishna, Eds. Springer US, pp. 231-244, 2011.
- [34] W. J. Hopp y M. L. Spearman, "Factory physics - Foundations of Manufacturing Management", Irwin/McGraw-Hill, 2011.
- [35] Y. Xing, L. Li, Z. Bi, M. Wilamowska-Korsak y L. Zhang, "Operations Research (OR) in Service Industries: A Comprehensive Review", *Systems Research and Behavioral Science*, vol. 30, no. 3, pp. 300-353, 2013.
- [36] J. C. Figueroa-García, D. Kalenatic y C. A. Lopez-Bello, "Multi-period Mixed Production Planning with uncertain demands: Fuzzy and interval fuzzy sets approach", *Fuzzy Sets Systems*, vol. 206, pp. 21-38, 2012.
- [37] E. R. López-Santana, C. Franco y J. C. Figueroa-Garcia, "A Fuzzy Inference System to Scheduling Tasks in Queueing Systems", in *Intelligent Computing Methodologies*, De-Shuang Huang, A. Hussain, K. Han y M. M. Gromiha, Eds. Springer International Publishing AG, pp. 286-297, 2017.
- [38] J. Blazewicz, K. H. Ecker, E. Pesch, G. Schmidt y J. Weglarz, "Handbook on Scheduling: From Theory to Applications", Springer, 2007.
- [39] G. Méndez-Giraldo, "Programación de tareas-Scheduling", Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2011.
- [40] M. Pinedo, C. Zacharias y N. Zhu, "Scheduling in the service industries: An overview", *Journal of systems science and systems engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 1-48, 2015.
- [41] K. Braekers, K. Ramaekers y I. Van Nieuwenhuysse, "The vehicle routing problem: State of the art classification and review", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 99, pp. 300-313, 2016.
- [42] M. M. Flood, "The traveling-salesman problem", *Oper. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 61-75, 1956.
- [43] J. Van Den Bergh, J. Beliën, P. De Bruecker, E. Demeulemeester y L. De Boeck, "Personnel scheduling: A literature review", *European Journal of Operational Research*, vol. 226, no. 3, pp. 367-385, 2013.
- [44] M. L. Pinedo, "Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems", Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [45] S. M. Ross, "Stochastic Processes", 2nd ed. Wiley, 1995.

- [46] R. O. Baldwin, N. J. Davis IV, S. F. Midkiff y J. E. Kobza, "Queueing network analysis: concepts, terminology, and methods", *Journal of systems and software*, vol. 66, no. 2, pp. 99-117, 2003.
- [47] A. Madureira, I. Pereira y N. Sousa, "Collective intelligence on dynamic manufacturing scheduling optimization", in *Proceedings 2010 IEEE 5th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications, BIC-TA 2010*, pp. 1693-1697, 2010.
- [48] P. Toth y D. Vigo, "The vehicle routing problem", vol. 9. Philadelphia: SIAM, 2002.
- [49] D. Laha, "Heuristics and Metaheuristics for Solving Scheduling Problems", *Handbook of Computational Intelligence in Manufacturing and Production Management*, pp. 1-18, 2007.
- [50] S. J. Russell y P. Norvig, "Artificial Intelligence: A Modern Approach", Prentice Hall, 2010.
- [51] E. R. Lopez-Santana, G. A. Méndez-Giraldo y G. F. Florez Becerra, "On the conceptual design of multi-agent system for load balancing using multi-class queueing networks", *Workshop on Engineering Applications-International Congress on Engineering 2015 (WEA)*, pp. 1-7, 2015.
- [52] J. L. Berrocal et al., "Agentes Inteligentes: el siguiente paso en la Inteligencia Artificial", *Revista Española de Documentación Científica*, vol. 26, no. 1, pp. 95-99, 2011.
- [53] Z. Dan, L. Cai y L. Zheng, "Improved Multi-Agent System for the Vehicle Routing Problem with Time Windows", *Tsinghua Science and Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 407-412, 2009.
- [54] Y. Chen, X. Wang, F. Lin y K. Tang, "The multi-agent modelling of production logistics system and the shop dynamic scheduling optimization in discrete manufacturing enterprises", In *Proc. International Technology and Innovation Conference 2006*, pp. 604-610, 2006.
- [55] J. M. Usher, "Negotiation-based routing in job shops via collaborative agents", *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 14, no. 5, pp. 485-499, 2003.
- [56] R. Erol, C. Sahin, A. Baykasoglu y V. Kaplanoglu, "A multi-agent based approach to dynamic scheduling of machines and automated guided vehicles in manufacturing systems", *Applied Soft Computing Journal*, vol. 12, no. 6, pp. 1720-1732, 2012.
- [57] L. Álvarez, C. Caicedo, M. Malaver y G. Méndez, "Investigación y desarrollo de un prototipo de Sistema Experto para Scheduling en Pymes con entorno Job Shop" *Revista Científica*, vol. 0, no. 12, 2011.
- [58] K. S. Metaxiotis, D. Askounis y J. Psarras, "Expert systems in production planning and scheduling: A state-of-the-art survey", *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 13, no. 4, pp. 253-260, Aug. 2002.
- [59] G. Méndez-Giraldo, L. Álvarez, C. Caicedo y M. Malaver, "Expert system for scheduling production-research and development of a prototype", 1st ed. Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2013.
- [60] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera, "Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools," *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 62, no. 7, pp. 1382-1402, 2011.
- [61] L. Waltman, N. J. van Eck y E. C. M. Noyons, "A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks", *Journal of Informetrics*, vol. 4, no. 4, pp. 629-635, 2010.
- [62] F. Talib, Z. Rahman y M. N. Qureshi, "An empirical investigation of relationship between total quality management practices and quality performance in Indian service companies", *International journal of quality & reliability management*, vol. 30, no. 3, pp. 280-318, 2013.
- [63] K. Selviaridis y A. Norrman, "Performance-based contracting in service supply chains: A service provider risk perspective", *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 153-172, 2014.
- [64] K. Xing, H.-F. Wang y W. Qian, "A sustainability-oriented multi-dimensional value assessment model for product-service development", *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 19, pp. 5908-5933, 2013.
- [65] B. Edvardsson, T. Meiren, A. Schäfer y L. Witell, "Having a strategy for new service development - does it really matter?", *Journal of Service Management*, vol. 24, no. 1, pp. 25-44, 2013.
- [66] M.-H. Huang y R. T. Rust, "IT-Related Service: A Multidisciplinary Perspective", *Journal of Service Research*, vol. 16, no. 3, pp. 251-258, 2013.
- [67] A. Chiarini, "Strategies for developing an environmentally sustainable supply chain: Differences between manufacturing and service sectors", *Business Strategy and the Environment*, vol. 23, no. 7, pp. 493-504, 2014.
- [68] K. Balka, C. Raasch y C. Herstatt, "The effect of selective openness on value creation in user innovation communities", *Journal of Product Innovation Management*, vol. 31, no. 2, pp. 392-407, 2014.
- [69] X. Wang y C. Durugbo, "Analysing network uncertainty for industrial product-service delivery: A hybrid fuzzy approach", *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 11, pp. 4621-4636, 2013.
- [70] A. Y.-L. Chong y L. Zhou, "Demand chain management: Relationships between external antecedents, web-based integration and service innovation performance", *International Journal of Production Economics*, vol. 154, pp. 48-58, 2014.
- [71] F. Ceschin, "How the design of socio-technical experiments can enable radical changes for sustainability", *Int. J. Des.*, vol. 8, no. 3, pp. 1-21, 2014.
- [72] T. Jin, Z. Tian y M. Xie, "A game-theoretical approach for optimizing maintenance, spares and service capacity in performance contracting", *International Journal of Production Economics*, vol. 161, pp. 31-43, 2015.
- [73] H. U. Khan, H. A. Artail, Z. Malik y M. Niazi, "Information technology adoption, possible challenges, and framework of supply chain management: A case study of a leading gulf economy", in *2014 4th International Conference on Engineering Technology and Technopreneuship, ICE2T 2014*, 2015.
- [74] J. W. Wang, H. F. Wang, W. J. Zhang, W. H. Ip y K. Furuta, "On a unified definition of the service system: What is its identity?", *IEEE Systems Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 821-826, 2014.
- [75] C. Y. Heo, S. Lee, A. Mattila y C. Hu, "Restaurant revenue management: Do perceived capacity scarcity and price differences matter?", *International Journal of Hospitality Management*, vol. 35, pp. 316-326, 2013.
- [76] D. Mourtzis, S. Fotia y M. Doukas, "Performance indicators for the evaluation of product-service systems design: A review", *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 460, pp. 592-601, 2015.
- [77] C. Durugbo, "Strategic framework for industrial product-service co-design: Findings from the microsystems industry", *International Journal of Production Research*, vol. 52, no. 10, pp. 2881-2900, 2014
- [78] M. Lepmets, A. L. Mesquida, A. Cater-Steel, A. Mas y E. Ras, "The evaluation of the IT service quality measurement framework in industry", *Global Journal of Flexible Systems Management*, vol. 15, no. 1, pp. 39-57, 2014.

- [79] Y. H. V. Lun, K.-H. Lai, C. W. Y. Wong y T. C. E. Cheng, "Demand chain management in the container shipping service industry", *International journal of production economics*, vol. 141, no. 2, pp. 485-492, 2013.
- [80] E. Marilungo, M. Peruzzini y M. Germani, "An integrated method to support PSS design within the Virtual Enterprise", in *Procedia CIRP*, vol. 30, pp. 54-59, 2015.
- [81] C. Stary, "Non-disruptive knowledge and business processing in knowledge life cycles – Aligning value network analysis to process management", *Journal of Knowledge Management*, vol. 18, no. 4, pp. 651-686, 2014.
- [82] J. Gallego, L. Rubalcaba y C. Hipp, "Services and organisational innovation: the right mix for value creation," *Management Decision*, vol. 51, no. 6, pp. 1117-1134, 2013.
- [83] M. M. De Carvalho, L. L. Ho y S. H. B. Pinto, "The Six Sigma program: An empirical study of Brazilian companies", *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 25, no. 5, pp. 602-630, 2014.
- [84] X. Xu, J. Y. L. Thong y V. Venkatesh, "Effects of ICT service innovation and complementary strategies on brand equity and customer loyalty in a consumer technology market", *Inf. Syst. Res.*, vol. 25, no. 4, pp. 710-729, 2014.
- [85] Y.W. Liao, Y.M. Wang, Y.-S. Wang y Y. M. Tu, "Understanding the dynamics between organizational IT investment strategy and market performance: A system dynamics approach", *Computers in Industry*, vol. 71, pp. 46-57, 2015.
- [86] G. Poels, G. Van Der Vurst y E. Lemey, "Towards an ontology and modeling approach for service science", *Lecture Notes in Business Information Processing*, vol. 143 LNBIP. pp. 285-291, 2013.
- [87] C. Wishon y J. Rene Villalobos, "Alleviating food disparities with mobile retailers: Dissecting the problem from an or perspective", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 91, pp. 154-164, 2016.
- [88] G. Marqués, M. Chalal y X. Boucher, "PSS production systems: A simulation approach for change management", *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 398, no. PART 2. pp. 377-384, 2013.
- [89] B. Tan, S. B. Gershwil, G. Liberopoulos, S. M. Meerkov y C. T. Papadopoulos, "Advances in stochastic models of manufacturing and service operations", *Annals of Operations Research*, vol. 231, no. 1, 2015.
- [90] B. Singh, S. Grover y V. Singh, "A benchmarking model for Indian service industries using MICMAC and WISM approach", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 8, pp. 1266-1281, 2017.
- [91] T. Rihm y N. Trautmann, "A decomposition heuristic for short-term planning of assessment centres", *European journal of industrial engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 725-751, 2017.
- [92] J. K. von Bischhoffshausen, P. Hottum y R. Schüritz, "Service science textbooks: Opportunities of an interdisciplinary approach" *Lecture Notes in Business Information Processing*, vol. 247. pp. 742-749, 2016.
- [93] Y. T. Akada y H. K. Awamura, "Time and motion study for operation improvement in Ryokans", *Journal of Japan Industrial Management Association*, vol. 66, no. 4E, pp. 448-459, 2015.
- [94] M. Yuan, T. Shieh, G. Lu y Y. Lin, "The applications of industrial engineering in agriculture production management", in *Proceedings of the 5th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation, IEMI 2014*, pp. 403-408, 2014.
- [95] L. A. Medina y R. Silva, "Industrial engineering from the vision of a portable automated model", in *IIE Annual Conference and Expo 2014*, pp. 3673-3682, 2014.
- [96] L. Yue, "Application of IE method in modern agro-ecological park planning", in *19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management: Assistive Technology of Industrial Engineering*, pp. 157-169, 2013.
- [97] J. A. Castillo-Salazar, D. Landa-Silva y R. Qu, "Workforce scheduling and routing problems: literature survey and computational study", *Annals of Operations Research*, pp. 1-29, 2014.
- [98] G. Laporte, "Scheduling issues in vehicle routing", *Annals of Operations Research*, vol. 236, no. 2, pp. 463-474, 2016.
- [99] E. V. Gutiérrez y C. J. Vidal, "Home Health Care Logistics Management Problems: A critical review of models and methods", *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. 68, pp. 160-175, 2013.
- [100] M. Defraeye y I. Van Nieuwenhuysse, "Staffing and scheduling under nonstationary demand for service: A literature review", *Omega (United Kingdom)*, vol. 58, pp. 4-25, 2016.
- [101] C. Fikar y P. Hirsch, "Home health care routing and scheduling: A review", *Computers & Operations Research*, vol. 77, pp. 86-95, 2017.
- [102] L. Abbatecola, M. P. Fanti y W. Ukovich, "A review of new approaches for Dynamic Vehicle Routing Problem", *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 361-366, 2016.
- [103] S. Moons, K. Ramaekers, A. Caris y Y. Arda, "Integrating production scheduling and vehicle routing decisions at the operational decision level: A review and discussion", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 104, pp. 224-245, 2017.
- [104] M. Cissé, S. Yalçındağ, Y. Kergosien, E. Şahin, C. Lenté y A. Matta, "OR problems related to Home Health Care: A review of relevant routing and scheduling problems", *Oper. Res. Heal. Care*, vol. 13-14, pp. 1-22, 2017.
- [105] L. C y S. A. Iyer, "Application of queueing theory in health care: A literature review", *Operations Research for Health Care*, vol. 2, pp. 25-39, 2013.
- [106] A. Madureira, I. Pereira, P. Pereira y A. Abraham, "Negotiation mechanism for self-organized scheduling system with collective intelligence" *Neurocomputing*, vol. 132, pp. 97-110, May 2014.
- [107] H. Zhang, D. Tang, T. Huang y C. Xu, "An Agent Based Intelligent Distributed Control Paradigm for Manufacturing Systems", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no 12, pp. 1549-1554, 2016.
- [108] P. T. Vanberkel, R. J. Boucherie, E. W. Hans y J. L. Hurink, "Optimizing the strategic patient mix combining queueing theory and dynamic programming", *Computers & operations research*, vol. 43, pp. 271-279, 2013.
- [109] E. López-Santana, W. C. Rodríguez-Vásquez y G. Méndez-Giraldo, "A hybrid expert system, clustering and ant colony optimization approach for scheduling and routing problem in courier services", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 9, no. 3, pp. 369-396, 2018.

Evaluación de una metodología de generación de ideas de negocio basado en patentes libres

Jonathan D. Morales M.¹

Eduwin A. Flórez O.²

Marta E. Carreño G.³

Andrea C. Patarroyo R.⁴

^{1, 2, 4} Universidad Santo Tomas

³ Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo Uniciencia
Colombia

El Centro de emprendimiento y desarrollo empresarial de la USTA en su labor de fomento de la mentalidad y cultura innovadora en articulación con la investigación, ha encontrado que existen algunos vacíos en la cadena de emprendimiento que requieren atención: Uno de ellos el déficit en la generación de ideas de negocio, según información del Ministerio de Comercio Industria y Turismo y basado en el análisis de la oferta regional de las entidades que hacen parte del ecosistema de emprendimiento. Para ello previamente se creó una metodología que facilita la generación de ideas de negocio a partir del análisis de las patentes libres, es decir, utilizar ideas patentadas por otros pero que pueden ser aplicados a los contextos locales donde se constituyan como una innovación. En el presente trabajo se toma la metodología creada, se valida con usuarios del Centro de Emprendimiento y Desarrollo Empresarial de la Universidad Santo Tomás, el centro de emprendimiento de la Corporación Universitaria Ciencia y Desarrollo Uniciencia. El resultado del trabajo presentado supone el insumo para el diseño de una plataforma web que permite abrir esta metodología a toda la mayor cantidad de emprendedores.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo y la economía han ido evolucionando a lo largo del tiempo, su estado siempre ha sido cambiante "La economía colombiana está migrando hacia a un nuevo terreno de inmensos desafíos, pero también de perspectivas muy favorables y grandes oportunidades. De competir por bienes y servicios de menor valor agregado con países de bajos ingresos y de contar con una economía cerrada, Colombia está transitando hacia un país moderno, con mercados abiertos y competidores más sofisticados." [1]. Y se ha ido evidenciando con el incremento de emprendedores que se lanzan a este nuevo mercado con sus ideas de negocio creando empresas, impactando de forma novedosa en la industria.

Lamentablemente aún no tenemos las herramientas necesarias para surgir en este arduo camino del emprendimiento pues se presentan algunas falencias tales como las arrojadas por la "Encuesta a Emprendedores 2014 [12] sobresalen falencias como el déficit de herramientas y metodologías para validar ideas de negocio". Sin tener en cuenta la crisis social y cultural de la población excluida socialmente, entre muchas otras, el estado y algunas entidades privadas han hecho algunas iniciativas para hacer del emprendimiento una opción de vida en Colombia y lograr reducir el índice de desempleo en el país [2] por lo que el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinCIT) [13], ha visto la necesidad de unificar los conceptos de productividad, emprendimiento e innovación.

Una forma de lidiar con la crisis social y la población en riesgo de exclusión surge de la una oportunidad para que empresas y cooperativas sean agentes de transformación e implemente el emprendimiento solidario [3] este busca mejorar el bienestar social y económico de la población excluida del mercado laboral, generando empleos y un modelo socioeconómico de desarrollo alternativo. El sector empresarial solidario se ha convertido en el medio para garantizar a buena parte de la sociedad, oportunidades y nuevas alternativas en pro de una mejora en la calidad de vida [3].

Según el Estudio General de Emprendimiento (GEM) [11], la tasa total de nueva actividad emprendedora en Colombia es del 23.7%, dándole el 4to lugar en el grupo de países latinoamericanos Colombia es un país emprendedor, pero según estos estudios aún quedan factores importantes que se deben potenciar para optimizar el desarrollo del país, ya que la sustentabilidad de estos negocios a lo largo del tiempo ha ido decreciendo, esto quiere decir que la actividad emprendedora se reduce después de 3 años de existencia, según estadísticas de la investigación realizada por el GEM.

Estudios has demostrado que gran parte de jóvenes estudiantes de ingeniería en varias universidades que sobre salen en algunas variables demográficas y sociales, se muestran más animados hacia el emprendimiento "El análisis de los resultados muestra que la mayoría de los estudiantes universitarios tienen una actitud positiva hacia la creatividad y el emprendimiento [4], la creatividad y el emprendimiento hacen una asociación muy importante y positiva, pues dichos componentes marcan una diferencia significativa en tanto al nivel cursado del estudiante, la experiencia laboral y la necesidad financiera. La Tabla 1 es un trabajo en el que se identifican las diferentes visiones sobre el emprendimiento a lo largo de la historia.

¹ jonathan.morales@ustabuca.edu.co

² eduwin.florez@ustabuca.edu.co

³ mareugenia64@gmail.com

⁴ andrea.patarroyo@ustabuca.edu.co

Tabla 32. Siete perspectivas sobre el Emprendimiento

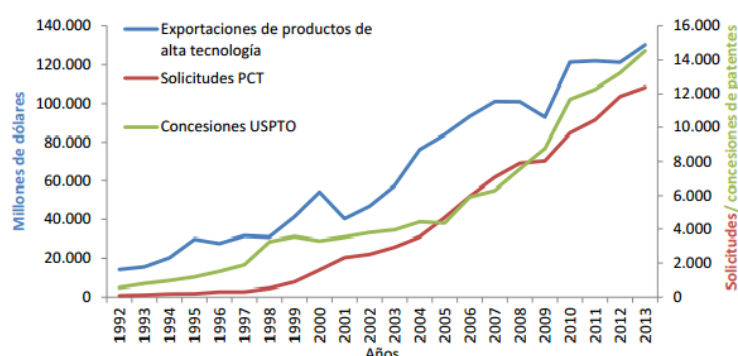
Creación de Riqueza	El emprendimiento incluye la asunción de riesgo asociado con el fomento de la producción a cambio de utilidades.
Creación de empresa	El emprendimiento supone el nacimiento de un nuevo proyecto de negocio que no ha existido con anterioridad.
Creación de Innovación	Se concentra en una combinación única de recursos que hace obsoletos los métodos o productos existentes.
Creación de Cambio	El emprendimiento supone la creación del cambio por medio del ajuste, la adaptación y la modificación de los enfoques personales para abordar las oportunidades disponibles en el entorno
Creación de Trabajo	El emprendimiento se concentra en emplear, administrar y desarrollar los factores de producción, incluyendo la fuerza laboral.
Creación de Valor	El emprendimiento un proceso de creación de valor para los clientes, por medio del uso de oportunidades no descubiertas.
Creación de crecimiento	El emprendimiento se define como una orientación fuerte y positiva hacia el crecimiento en ventas, ingresos, activos y empleo.

Según [5] las nuevas compañías independientes poseen mayores posibilidades de éxito cuando penetran mercados en estado embrionario, lo que quiere decir que penetrar estos mercados puede ser viable, si se segmenta adecuadamente los sectores con un marketing personalizado. Otra clave del éxito empresarial que fue analizada es el rápido reconocimiento de las oportunidades, como decía [6], que la misión principal del emprendedor es la búsqueda incansable de la oportunidad, debido a que esta acción es fundamental para el aprovechamiento oportuno de fuentes de ideas.

Las patentes son fuentes importantes de información que contienen claras y completas descripciones de invenciones para la industria, estas conceden un derecho de exclusividad a una persona o grupo de personas por un tiempo limitado y que en determinado momento la patente se convierte en dominio público. Actualmente, el gobierno nacional se ha enfocado en la competitividad haciendo promoción de la innovación y el emprendimiento, y gracias a estos ha surgido redes como La Red Nacional de Emprendimiento, las Redes Regionales de Emprendimiento y la Red Universitaria de Emprendimiento, estas redes necesitan la participación de actores que ayuden a promover la cultura emprendedora, empresarial e innovadora, y que aporten a la transformación económica y social sostenible para el país [7].

“Para el análisis de información de patentes se utilizan diferentes herramientas algunas van de acuerdo al tamaño de la muestra a analizar, el alcance o finalidad del estudio, así lo demuestra en el estudio que realizó” [8].

Partiendo de una idea presentada en el segundo Simposio de Emprendimiento celebrado en Bogotá en el 2014, se conoce que las bases de datos de patentes abarcan hasta el 95% [14] de los resultados mundiales de patentes. Existe una relación estratégica las Patentes y el Desarrollo tecnológico, pues con estrategias de innovación basadas en patentes internacionales se evidencia un aumento en las exportaciones de alta tecnología, como ejemplo esta “El modelo de desarrollo de base tecnológica de Corea del Sur, evidencia la relación que existe entre innovación tecnológica orientada a exportaciones y las concesiones de patentes en los principales mercados mundiales” [9] (Figura 1).

**Figura 1.** Relación entre innovación tecnológica patentable y exportaciones de alta tecnología en Corea del Sur

Dentro de los enfoques para promover la competitividad en Colombia, el Gobierno ha avanzado en la creación de leyes, proyectos y programas, como la Ley 1014 de 2006 para el Fomento al Emprendimiento, la Política Nacional de Emprendimiento (2009), CONPES 3527: Política Nacional de Competitividad y Productividad, además del posicionamiento central de estos temas en el Plan Nacional de Desarrollo (Ley 1450 de 2011), buscando el direccionamiento hacia el desarrollo económico, a través de procesos de creación de empresas competentes, con alto nivel de planeación y visión a largo plazo.

La Universidad Santo Tomas ha realizado actividades en pro de la comunidad universitaria a través del Centro de Emprendimiento, como por ejemplo: la Catedra de Emprendimiento que es realizada semestre a semestre, anualmente también se celebra la feria de emprendimiento, al igual que cátedras virtuales de emprendimiento y

emprendimiento de alto impacto; también se han desarrollado herramientas como “Modelo de intervención para el fortalecimiento empresarial de microempresas en el departamento de Santander”. Por otro lado, estudios internacionales realizados por Carrión y Ruiz, determinan la utilidad de las patentes como fuente valiosa de información. [10] Para la Oficina de Patentes de Estados Unidos (USPTO), en las patentes se registra tecnología que rara vez vuelve a utilizarse, puesto que más del 80% de la información contemplada no vuelve a ser publicada por otro medio. Los documentos de patentes contienen información relevante para la industria, como descripciones claras y completas de las invenciones, que representan información altamente valiosa y veraz para su utilización.

Partiendo de las técnicas sugeridas por la Mesa Nacional de Emprendimiento y teniendo en cuenta la utilidad de las patentes como fuentes de información, el CEDE debe articular dentro de sus acciones estratégicas la creación de instrumentos en la etapa de identificación. El uso de patentes libres permite ampliar las posibilidades de generación de ideas de negocio brindadas a los emprendedores de la Universidad Santo Tomás e instituciones conexas a la Red Regional de Emprendimiento de Santander, Debido a las falencias que se presentaron según la encuesta a Emprendedores y la información relevante que podemos obtener de las patentes libres, Silvia creó una herramienta que permite generar ideas de negocios basadas en las patentes ya caducadas. Esta metodología sirve como base fundamental para ideas de negocio y creación de empresas; por lo que el Centro de Emprendimiento y Desarrollo Empresarial CEDE, de la Universidad Santo Tomás adoptó esta metodología, como aporte al sector emprendedor. Para complementar dicha herramienta se evaluará, actualizará y determinará si se puede implementar, aplicándola en creación de empresas

La creación de una metodología que permita generar ideas de negocios basándose en las patentes caducadas ofrece un instrumento para la comunidad universitaria y la región que puede ser consultado y utilizado como base para la incubación de ideas de negocio. La universidad Santo Tomás cuenta con una metodología realizada por Silvia Villareal para su proyecto de grado [7] que permite generar ideas de negocio basada en la búsqueda de patentes que ya han caducado, por lo tanto están libres a todo público, esta metodología surge gracias a los resultados obtenidos a partir de la encuesta hecha a los emprendedores (Encuesta Anual a Emprendedores) según datos obtenidos se observó un déficit en metodologías de este tipo debido a que no hay muchas herramientas que ayuden o faciliten la información necesaria para emprender proyectos y no cometer errores en el arduo camino de este proceso.

La tarea principal que cumplen las Unidades de Emprendimiento y las instituciones educativas, en la cadena de competitividad, es generar la mentalidad y cultura de la comunidad académica y brindar herramientas que permitan a los emprendedores identificar y formular ideas basadas en las necesidades, problemas u oportunidades del entorno. El Centro de Emprendimiento y Desarrollo Empresarial CEDE, es una unidad creada por la universidad que tiene, como una de sus funciones, brindar un espacio directo a los emprendedores, facilitando este tipo de guías o herramientas que serán de gran uso en el trayecto desde que se inicia hasta después de finalizado el proceso, pues estas herramientas pueden ser utilizadas para un mejoramiento continuo de la empresa, por lo que para prestar un buen servicio o ayuda se deben evaluar dichas herramientas para su correcto funcionamiento y puesta en acción.

Esta herramienta era de gran ayuda no solo a estudiantes universitarios de la universidad Santo Tomás, ya que gracias a su amplio campo de búsqueda, puede ser implementada por cualquiera que desee generar una idea de negocio, así que, esta herramienta estará disponible para estudiantes de la universidad Santo Tomás, de todas las carreras ya que no tiene restricciones, estudiantes de demás universidades, personas fuera del sector universitario, emprendedores, personas que deseen hacer una invención o que necesiten información para que no infrinjan en delitos por no conocer adecuadamente las leyes y requisitos de patentes.

2. MÉTODO

La metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres se divide en tres etapas (Figura 2).

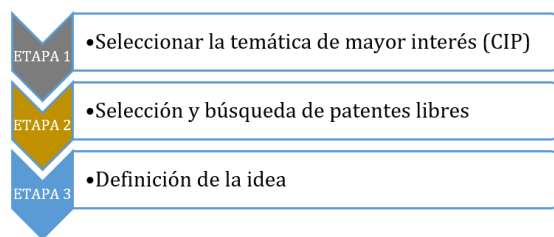


Figura 2. Etapas de la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres

2.1 Selección de la temática de mayor interés

Esta etapa consiste en la selección de la temática de mayor interés por el usuario, teniendo en cuenta la CIP Clasificación Internacional de Patentes, la cual consiste en un sistema jerárquico de símbolos que permiten clasificar las patentes de acuerdo al sector al que pertenecen, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 33. Jerarquización de las patentes

Nivel	Nombre	Descripción	Símbolo	Ejemplo
1	Sección	Conjunto de conocimientos que se consideran incluidos en ámbito de las patentes	Letra mayúscula (A a la H)	A B C
2	Clase	Brinda una indicación del contenido	Número de dos dígitos	01 23
3	Subclase	Contenido más específico	Letra mayúscula	S
4	Grupo	Materia considerada de utilidad para la búsqueda relativa	Dos o tres números separados por una barra oblicua (/)	3/02

Cada letra mayúscula en la CIP corresponde a una sección con un tema:

Sección A: Necesidades de la vida corriente.

Sección B: Técnicas industriales; Transportes.

Sección C: Química; Metalúrgica.

Sección D: Textiles; Papel.

Sección E: Construcciones fijas.

Sección F: Mecánica, Iluminación: Calefacción; Armamento; Voladuras.

Sección G: Física.

Sección H: Electricidad

Continuando con la etapa 1 y con el fin de simplificar la búsqueda solo se trabajará con los dos primeros niveles: Sección – Clase. Ingrese al siguiente link <https://bit.ly/2HPJIVh> para encontrar la lista de opciones con las diferentes categorías de la Clasificación Internacional de Patentes.

Apéndice A Clasificación Internacional de Patentes.

Después de seleccionar el tema de interés, ejemplo: A23 (A: necesidades de la vida corriente), avanza a la etapa 2.

2.2 Selección y búsqueda de patentes libres

En esta etapa se utiliza el buscador Patentscope (Figura 3).



Figura 3. Buscador Patentscope

2.3 Definir la idea

Esta es la última etapa y para el desarrollo de la misma será necesario el lienzo Lean Canvas que ayudará a definir la idea de negocio teniendo en cuenta la información de la patente seleccionada. “El lienzo del modelo Lean Canvas es una herramienta basada en el modelo Canvas, que se centra en las soluciones que aporta al cliente un producto o servicio” [7]. El lean Canvas se encuentra distribuido por 9 bloques los cuales debe completar a partir de la patente seleccionada (Figura 4).

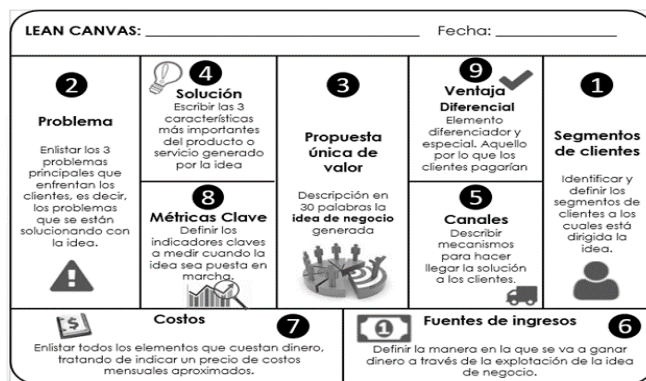


Figura 4. Modelo Lean Canvas

Con esto finaliza la metodología de generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, con la idea generada se puede seguir trabajando para convertirla en un negocio. Es necesario suministrarle al usuario información sobre

patentes en caso de no conocer sobre el tema, así como la explicación del lienzo Lean Canvas, ya que estos conceptos son básicos para el desarrollo o funcionamiento correcto de la metodología generación de Ideas de negocio a partir de patentes libres. De igual forma es necesario contar con acceso a internet ya que el usuario debe hacer el ingreso a la página web de Patenscope de la que se extraerá la información necesaria sobre la patente seleccionada. Conjunto a esto el encargado de la metodología deberá estar pendiente de las actualizaciones hechas al sitio web de Patenscope ya que pueden variar o mejorar con el tiempo. El suministro del material complementario es necesario para el desarrollo de la metodología, como lo es el documento CIP, por lo que se ha facilitado los links requeridos en cada etapa, así como también el lienzo Lean Canvas en físico.

3. RESULTADOS

La aplicación de la prueba piloto consiste en recolectar información fundamental o relevante durante el desarrollo de la actividad, cuya finalidad es arrojar resultados para los cuales se pueda mejorar o aclarar la metodología y su aplicación sea sencilla y fácil de comprender. A continuación, se nombrarán los pasos a seguir para la aplicación de la prueba.

1. *Solicitar*: Como primera parte se solicita a los correspondientes encargados secretaria de educación de las salas u auditorios de la Universidad Santo Tomas para hacer la actividad, el espacio debe contar con internet, sonido, proyección de Video Beam y equipos computarizados para el trabajo oportuno de los usuarios. Por otra parte, se solicita a los docentes encargados de cada semestre un espacio de 2 horas para llevar acabo la aplicación de la metodología de búsqueda de patentes libres para la generación de ideas de negocio y finalmente se acuerda una fecha y hora para la actividad.
2. *Encuentros*: con cada grupo se hacen dos encuentros, el primero consta de la aplicación del instrumento I antes de conocer la metodología, la explicación, guía y aplicación de la metodología de búsqueda de patentes libres para la generación de ideas de negocio hasta concluir con la generación de la idea de negocio en el modelo Lean Canvas, en este proceso se hace entrega de los documentos nombrados en el ítem 3. El segundo encuentro (encuentro final) se realiza una semana después del primer encuentro, en este se aplica nuevamente el instrumento I al cual en esta parte de la aplicación se ha llamado instrumento III.
3. *Documentos*: El encargado de la aplicación de la metodología debe facilitar a los estudiantes los documentos como lista de asistencia, folletos con información o conceptos sobre patentes, el documento de la CIP Clasificación Internacional de Patentes, el lienzo Lean Canvas y diapositivas para la comprensión de la metodología.

3.1 Línea base de la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres

Se diseñó un instrumento el cual fue validado mediante la V de Aiken por especialistas en el tema y se determinó su confiabilidad con un alfa de Cronbach de 0.92, este se aplicó a los estudiantes de ingeniería industrial y carreras administrativas desde primer a octavo semestre de la Universidad Santo Tomas y de la Corporación Universitaria UNCIENCIA. Como parte de este piloto se diseñó y valido un instrumento que permitiera medir los presaberes respecto al tema de patentes y este mismo se aplicaba después de aplicado el algoritmo, para la validación de este instrumento se usó el método de la V de Aiken.

En la elaboración del cuestionario o instrumento se tomó en cuenta la selección del tipo y orden adecuado de las preguntas, en esta parte se realizó el juicio de especialistas para validar el contenido de las preguntas y adecuar según corresponda a los aspectos de estudio. "Una medida es válida cuando mide lo que pretende y es fiable cuando lo mide bien y con precisión" [35]. Los especialistas que participaron en la validación se describen a continuación:

1. Ingeniera industrial, magister en ingeniería industrial, conocimientos en dirección técnica de proyectos de ingeniería estándar PMI. Estudios de factibilidad de proyectos de inversión, Auditor interno sistemas de gestión de la calidad.
2. Ingeniero Industrial, magister en educación MBA en administración de empresas, docente universitario, Docente-consejero.
3. Administrador de empresas, Tecnólogo en sistemas, especialista en docencia universitaria, Magister en administración, Docente universitario, secretario de hacienda del municipio de Málaga, Coordinador de proyectos de la Diócesis de Málaga- Soata.
4. Ingeniero industrial, especialista en docencia universitaria, maestría en gestión de organizaciones, experiencia en docencia universitaria 6 años, 25 años en sectores privados como ingeniero de producción, dirección e interventoría de obras, inspector API en fabricación de tanques y líneas de transporte de combustible, inspector NACE en recubrimientos en el sector de hidrocarburos.

Estos especialistas siguieron las siguientes instrucciones

1. Lea cuidadosamente la sección correspondiente a cada ítem.
2. Indique la valoración dada pertinente a cada sección o pregunta de los ítems.
3. El contenido de cada ítem debe ser evaluado de manera individual en cuanto a redacción, entendimiento y contenido.
4. Califique el contenido de la pregunta o sección de cada ítem de acuerdo con su validez teniendo en cuenta la siguiente escala:

- (0) no tiene relación
- (1) validez nula
- (2) validez baja
- (3) validez aceptable
- (4) validez alta
- (5) validez superior.

Según corresponde al proceso se establece una escala de validez de acuerdo con el criterio de cada componente, conforme al contenido de cada pregunta (Tabla 3).

Tabla 34. Intervalos de validez

Intervalo	Escala
De 0,8 en adelante	válido
Entre 0,5 y 0,7	reformular
Menor a 0,5	No valido

Después de realizar el juicio de especialistas, en la Tabla 4 se aplica el coeficiente “V de Aiken” para validar el contenido de cada ítem o pregunta, con la ecuación (1).

$$V = \frac{S}{(n(c-1))} \quad (1)$$

Donde:

S: sumatoria de las respuestas dadas por los especialistas en cada ítem.

n: número de especialistas.

N: Numero de ítem.

c: número de valores en la escala de valoración (para este caso 6, escala: 0,1,2,3,4,5)

Tabla 35. Calculo de la V de Aiken

Ítem	Especialista					Total S	Media T/5	V de Aiken
	1	2	3	4	5			
1	4	4	5	5	5	23	4,6	0,92
2	4	4	5	5	5	23	4,6	0,92
3	5	4	5	5	5	24	4,8	0,96
4	4	4	5	5	5	23	4,6	0,92
5	5	4	5	5	5	24	4,8	0,96
6	5	4	5	5	5	24	4,8	0,96
7	5	4	5	5	5	24	4,8	0,96
8	4	4	5	5	5	23	4,6	0,92
9	5	4	5	5	5	24	4,8	0,96
10	5	4	5	5	5	24	4,8	0,96
11	5	4	5	5	5	24	4,8	0,96
Sumatoria								10,40
Total ítems								0,95

En la Tabla 5 se presenta el resumen con los parámetros V de Aiken.

Tabla 36. Resumen parámetros V de Aiken

Parámetro	Valor
E	5
N	11
c	6

Conforme al cálculo de la V de Aiken cada ítem es válido cuando el coeficiente V es igual o superior a 0.8, en cuanto al instrumento se demostró que es válido ya que el cálculo de la V es de 0.98. Además de la validez también se evaluó la confiabilidad, la confiabilidad se alude a la propiedad de mostrar resultados similares, sin errores y en repetidas

mediciones. [15]. El tipo de confiabilidad para aplicación del instrumento se entiende como consistencia interna ya que se refiere al grado en que los ítems se correlacionan entre ellos y la magnitud en que miden el mismo constructo [16]. Las pruebas de confiabilidad de consistencia interna de un instrumento de medición se puede realizar a través de diferentes fórmulas o métodos, unas de las más conocidas es la prueba de Alfa de Cronbach, este coeficiente se usa para escalas politómicas actualmente existen programas informáticos y estadísticos como SPSS que permiten el cálculo de este coeficiente, según el artículo de la revista Salud Publica, de acuerdo a este resultado la consistencia interna de un instrumento es adecuada si el coeficiente de Cronbach se encuentra entre los valores 0.80 y 0.90 [16]. George y Mallery [17] sugieren los siguientes criterios para evaluar el coeficiente de alfa de Cronbach:

- Coeficiente alfa >.9 es excelente.
- Coeficiente alfa >.8 es bueno.
- Coeficiente alfa >.7 es aceptable.
- Coeficiente alfa >.6 es cuestionable.
- Coeficiente alfa >.5 es pobre.
- Coeficiente alfa <.5 es inaceptable.

De esta forma se realiza el cálculo del coeficiente mediante el programa SPSS cuyos resultados se muestran en la Tabla 6, significando así que el instrumento es confiable al tener una Alfa de Cronbach de 0.976

Tabla 37. Cálculo del coeficiente Alfa de Cronbach

Alfa de Cronbach	0,976
Alfa de Cronbach basada en los elementos tipificados	0,978
N de elementos	11,000

Finalmente se logra concluir que el instrumento es válido ya que las pruebas realizadas de validez y confiabilidad, a través de los coeficientes de V de Aiken y el Alfa de Cronbach han sido suficientes o ha arrojado resultados óptimos, de esta manera se asume la validez del instrumento. Posterior a ello se procedió a calcular la muestra estadística que participaría en el piloto de la aplicación de la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, estableciendo como población de la prueba piloto a los estudiantes de ingeniería industrial de la Universidad Santo Tomas y programas administrativos de UNICIENCIA. Conforme a la información dada se formaron tres estratos divididos de la siguiente manera:

- Estrato 1: estudiantes de primero (1) a cuarto (4) semestre, para un total de 127 estudiantes por estrato corresponde una muestra de 24 estudiantes.
- Estrato 2: estudiantes de quinto (5) a sexto (6) semestre, para un total de 70 estudiantes por estrato, corresponde una muestra de 13 estudiantes.
- Estrato 3: estudiantes de séptimo (7) a octavo (8) semestre, para un total de 118 estudiantes por estrato, corresponde una muestra de 22 estudiantes.

Al analizar los resultados de los instrumentos aplicados se estableció una línea base para evaluar la metodología de la cual se puede sintetizar lo siguiente:

- Se puede decir sobre la pregunta ¿Cuáles de las siguientes definiciones corresponden a patente? Que no presenta tanta dificultad ya que el 95% de los encuestados respondieron correctamente y solo 5% restante respondieron erróneamente, ninguno de los encuestados respondió la opción de no conocer sobre el tema.
- De la pregunta ¿Cree usted que en Colombia es posible patentar una idea? De los encuestados solo el 25% respondieron correctamente, el 73,3% respondió erróneamente, y solo el 1,7% aseguraron no conocer sobre el tema, por lo que se puede concluir que esta pregunta es una de las que presento mayor dificultad.
- Se puede decir que la pregunta ¿Sabe usted el tiempo de exclusividad de una patente? que el 60% de los encuestados respondieron correctamente, el 23,3% respondió erróneamente, y solo el 16,7% aseguraron no conocer sobre el tema.
- De la pregunta ¿Cuáles son los requisitos para patentar? se puede decir que de los encuestados el 73,3% respondieron correctamente, el 18,3% respondió erróneamente, y solo el 8,3% aseguraron no conocer el tema.
- Del análisis de la gráfica se puede deducir que el 66% de los encuestados respondieron correctamente sobre que opciones se pueden patentar, el 28% respondió erróneamente, y solo el 5% aseguraron no conocer sobre el tema.
- Del análisis de la pregunta referida a la consecuencia de no patentar, se puede deducir que el 85% de los encuestados respondieron correctamente sobre las posibles consecuencias de no patentar, el 11% respondió erróneamente, y solo el 3% aseguraron no conocer sobre el tema.
- En la siguiente pregunta ¿Para que un invento sea novedoso requiere de? se puede decir que el 63,3% de los encuestados respondieron correctamente, el 35% respondió erróneamente, y solo el 1,7% aseguraron no conocer sobre el tema.

- De la siguiente pregunta ¿Cuáles cree que sean los beneficios que se obtiene al patentar? se puede decir que el 76,6% de los encuestados respondieron correctamente, el 15% respondió erróneamente, y solo el 8,3% aseguraron no conocer sobre el tema.
- Se puede decir de la pregunta ¿Cuáles son causales de una patente en dominio público? Que el 45% de los encuestados respondieron correctamente, el 33,3% respondió erróneamente, y solo el 21,7% aseguraron no conocer sobre el tema,
- De la pregunta ¿Qué derechos confiere una patente al que lo registra? Se puede decir que el 73,3% de los encuestados respondieron correctamente, el 20% respondió erróneamente, y solo el 6,7% aseguraron no conocer sobre el tema.
- Se puede deducir con relación a la gráfica y el análisis de los datos de la pregunta ¿Algunas de las condiciones para patentar son? que el 61,7% de los encuestados respondieron correctamente, el 28,3% respondieron erróneamente, y solo el 10% aseguraron no conocer sobre el tema.

3.2 Aplicación de la metodología

Posterior a esta base se procedió aplicar la metodología de generación de ideas de negocio sobre patentes libres de acuerdo con la metodología planteada. En la Tabla 7 se puede observar de manera resumida el impacto de las capacitaciones realizadas a los estudiantes, sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres.

Tabla 38. Capacitaciones realizadas en las Instituciones

Asistentes	Profesor acompañante	Estrato	Semestre	Ideas generadas	Total por estrato
9	Juan C. Cadena		1	15	
24	Marta Eugenia Carreño		2	12	
20	Víctor Méndez	1	4	12	39
21	Eduwin Flórez		5	12	
23	Juan C. Cadena	2	6	9	21
3	Karin Aguilar		7	7	
7	Juan C. Cadena	3	8	3	10
Total				70	70

De los estratos 1, 2 y 3 se obtuvo un total de 39, 21, y 10 ideas de negocios generadas respectivamente, lo que significa que los estudiantes entendieron y fueron capaces de construir una idea de negocio basado en la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres.

3.3 Evaluación de la metodología

Así mismo, se les solicitó a los estudiantes que calificaran la capacitación mediante el instrumento II, cuyo resultado se muestra y analiza en las Tablas 8 a 20.

Tabla 39. Evaluación de la metodología item 1: *Me parece que la metodología presentada resulta útil*

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
En desacuerdo	1	1,7	1,7	1,7
Medianamente en desacuerdo	1	1,7	1,7	3,3
Neutral	2	3,3	3,3	6,7
Medianamente de acuerdo	31	51,7	51,7	58,3
En acuerdo	25	41,7	41,7	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 1 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 93,4% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que la metodología presentada es útil, mientras que el 6,7% restante está en desacuerdo o su posición es neutral.

Tabla 40. Evaluación de la metodología item 2: *Creo que el vocabulario presentado en los anexos es adecuado*

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Medianamente en desacuerdo	1	1,7	1,7	1,7
Neutral	2	3,3	3,3	5,0
Medianamente de acuerdo	25	41,7	41,7	46,7
En acuerdo	32	53,3	53,3	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 2 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 95% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que el vocabulario presentado en los anexos es adecuado, mientras que el 5% restante está en desacuerdo o su posición es neutral.

Tabla 41. Evaluación de la metodología item 3: *Considero que la metodología está bien explicada y su aplicación es sencilla*

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
En desacuerdo	1	1,7	1,7	1,7
Medianamente en desacuerdo	1	1,7	1,7	3,3
Neutral	6	10,0	10,0	13,3
Medianamente de acuerdo	25	41,7	41,7	55,0
En acuerdo	27	45,0	45,0	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 3 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 86,7% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que la metodología está bien explicada y su aplicación es sencilla, el 13,4% restante está en desacuerdo o es neutral.

Tabla 42. Evaluación de la metodología item 4: *Se me facilito todos los conceptos necesarios para el desarrollo de la actividad*

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Medianamente en desacuerdo	1	1,7	1,7	1,7
Neutral	10	16,7	16,7	18,3
Medianamente de acuerdo	27	45,0	45,0	63,3
En acuerdo	22	36,7	36,7	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 4 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 81,7% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que se le facilitaron los conceptos necesarios para el desarrollo de la metodología, mientras que el 18,4% restante está en desacuerdo o su posición es neutral.

Tabla 43. Evaluación de la metodología item 5: *El material de trabajo es el adecuado para el desarrollo de la actividad*

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Neutral	8	13,3	13,3	13,3
Medianamente de acuerdo	18	30,0	30,0	43,3
En acuerdo	34	56,7	56,7	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 5 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 86,7% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que el material de trabajo es el adecuado para el desarrollo de la actividad, mientras que el 13,3% toman una posición neutral.

Tabla 44. Evaluación de la metodología item 6: *El lenguaje utilizado es claro y de fácil entendimiento*

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Neutral	4	6,7	6,7	6,7
Medianamente de acuerdo	22	36,7	36,7	43,3
En acuerdo	34	56,7	56,7	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 6 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 93,4% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que el lenguaje utilizado es claro y de fácil entendimiento, mientras que el 6,7% restante toma una posición neutral.

Tabla 45. Evaluación de la metodología item 7: *Los anexos entregados fueron claros y bien diseñados*

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Medianamente en desacuerdo	1	1,7	1,7	1,7
Neutral	2	3,3	3,3	5,0
Medianamente de acuerdo	24	40,0	40,0	45,0
En acuerdo	33	55,0	55,0	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 7 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 85% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que los anexos entregados fueron claros y bien diseñados, mientras que el 5% restante está en desacuerdo o su posición es neutral.

Tabla 46. Evaluación de la metodología item 8: *Los conceptos presentados se entendieron de manera lógica*

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Medianamente en desacuerdo	2	3,3	3,3	3,3
Neutral	6	10,0	10,0	13,3
Medianamente de acuerdo	23	38,3	38,3	51,7
En acuerdo	29	48,3	48,3	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 8 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 86,3% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que los conceptos presentados se entendieron de manera lógica, mientras que el 13,3% restante es neutral.

Tabla 47. Evaluación de la metodología ítem 9: Los cuadros e imágenes presentadas me fueron de gran ayuda durante el desarrollo de la actividad

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Medianamente en desacuerdo	1	1,7	1,7	1,7
Neutral	6	10,0	10,0	11,7
Medianamente de acuerdo	21	35,0	35,0	46,7
En acuerdo	32	53,3	53,3	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 9 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 88,3% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que los cuadros e imágenes presentadas me fueron de gran ayuda durante el desarrollo de la actividad, mientras que el 11,7% restante está en desacuerdo o su posición es neutral.

Tabla 48. Evaluación de la metodología ítem 10: Los cuadros e imágenes fueron los adecuados para su entendimiento

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Medianamente en desacuerdo	1	1,7	1,7	1,7
Neutral	7	11,7	11,7	13,3
Medianamente de acuerdo	27	45,0	45,0	58,3
En acuerdo	25	41,7	41,7	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 10 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 86,7% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que los cuadros e imágenes fueron los adecuados para su entendimiento, mientras que el 13,4% restante está en desacuerdo o su posición es neutral.

Tabla 49. Evaluación de la metodología ítem 11: Considero que a través de la metodología se puede generar ideas de negocio

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Neutral	9	15,0	15,0	15,0
Medianamente de acuerdo	16	26,7	26,7	41,7
En acuerdo	35	58,3	58,3	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 11 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 85% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que a través de la metodología se puede generar ideas de negocio, mientras que el 15% restante toma una posición neutral.

Tabla 50. Evaluación de la metodología ítem 12: Me parece que la metodología es una herramienta que permite el emprendimiento

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Medianamente en desacuerdo	1	1,7	1,7	1,7
Neutral	5	8,3	8,3	10,0
Medianamente de acuerdo	17	28,3	28,3	38,3
En acuerdo	37	61,7	61,7	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 12 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 90% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que la metodología es una herramienta que permite el emprendimiento, mientras que el 13,4% restante está en desacuerdo o su posición es neutral.

Tabla 51. Evaluación de la metodología ítem 13: Creo que la metodología no es compleja

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Neutral	7	11,7	11,7	11,7
Medianamente de acuerdo	20	33,3	33,3	45,0
En acuerdo	33	55,0	55,0	100,0
Total	60	100,0	100,0	

Del ítem 13 de los criterios evaluativos, se puede decir que el 88,3% de los estudiantes que participaron en la capacitación sobre la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres, considera que la metodología no es compleja, mientras que el 11,7% restante toma una posición neutral.

Como resultado de esta aplicación, tal como se puede se planteó el antes y el después de aplicar la metodología lo cual se puede observar en la Tabla 21 en la que se muestra una comparación del conocimiento sobre ideas de negocio a partir de patentes libres antes y después de aplicar la metodología.

Tabla 52. Evaluación pre-post metodología

Ítem	Antes	Después
¿Cuál de las siguientes definiciones corresponde a patente?	el 95% de los encuestados respondieron correctamente	El 93,3% de los encuestados respondieron correctamente
¿Cree usted que en Colombia es posible patentar una idea?	el 25% de los encuestados respondieron correctamente	El 30% de los encuestados respondieron correctamente.
¿Sabe usted el tiempo de exclusividad de una patente?	que el 60% de los encuestados respondieron correctamente	95% de los encuestados respondieron correctamente.
¿Cuáles son los requisitos para patentar?	el 73% de los encuestados respondieron correctamente	90% de los encuestados respondieron correctamente.
De las siguientes opciones ¿Cuáles se pueden patentar?	el 66% de los encuestados respondieron correctamente	90% de los encuestados respondieron correctamente.
¿Una de las posibles consecuencias de no patentar?	el 85% de los encuestados respondieron correctamente	86.7% de los encuestados respondieron correctamente.
¿Para que un invento sea novedoso requiere de?	el 63% de los encuestados respondieron correctamente	65% de los encuestados respondieron correctamente.
¿Cuáles cree que sean los beneficios que se obtiene al patentar?	el 76% de los encuestados respondieron correctamente	95% de los encuestados respondieron correctamente.
¿Cuáles son causales de una patente en dominio público?	el 45% de los encuestados respondieron correctamente	66,7% de los encuestados respondieron correctamente.
¿Qué derechos confiere una patente al que lo registra?	que el 73% de los encuestados respondieron correctamente	75% de los encuestados respondieron correctamente.
¿Algunas de las condiciones para patentar?	que el 61% de los encuestados respondieron correctamente	81,7% de los encuestados respondieron correctamente.

4. CONCLUSIONES

Según los resultados observados del instrumento aplicado después de conocer la metodología generación de ideas de negocio a partir de patentes libres se puede observar que hubo un aumento frente al conocimiento que tenían los estudiantes sobre los diferentes temas o conceptos de patentes después de conocer la metodología.

El usuario deberá conocer por lo menos los conceptos básicos sobre patentes, ya que sin estos el proceso de la metodología se verá afectado y no podrá llevarse a cabo o el resultado no será el esperado, por lo que se puede decir que esto es una debilidad.

El uso correcto de la metodología permite generar ideas de negocios que ayudan al emprendimiento, si el usuario continúa trabajando la idea generada es posible que pueda emprender su propio negocio o empresa.

De acuerdo con lo observado después de aplicar la prueba piloto de la metodología se puede decir que la misma resultara fácil y sencilla de comprender al usuario siempre y cuando tenga los conceptos básicos claros sobre patentes y el modelo Lean Canvas, como también los documentos necesarios para el desarrollo de cada una de las etapas, (C.I.P y Lean Canvas), ya que, de no ser así, el proceso se vería afectado.

Conforme a los ajustes y mejoras es importante la constante actualización de la metodología con respecto al sitio web de Patenscope, ya que en la metodología inicial se hacía obligatorio crear un usuario para poder acceder a la información sobre las patentes, con las nuevas actualizaciones no hace necesario crear un perfil, pues la página facilita esta información dando clic en la patente seleccionada, donde se podrá observar todo lo relacionado con esa patente como lo son documentos, diseños, formatos entre otros, además el usuario deberá contar con internet para poder ingresar al sitio web Patenscope, y en caso de que el usuario no tenga conocimientos sobre patentes que pueda ingresar a la web y documentarse.

REFERENCIAS

- [1] G. H. Jose y D. Mitchell, Innovación y Emprendimiento en Colombia-Balance, Perspectivas y recomendaciones de política, 2014.
- [2] L. M. Pedraza Torres, Laura María, et al. Estudio prospectivo sobre los centros de emprendimiento en Colombia: tendencias, escenarios y estrategias en la generación de oportunidades laborales alternativas, 2010.
- [3] F. Salinas y L. Osorio, Emprendimiento y Economía social, oportunidades y efectos en una sociedad en transformación, CIRIEC-España: *Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, 75, 129-151., 2012.
- [4] A. L. Pineda, Actitudes de creatividad y emprendimiento en estudiantes de la Universidad Nacional de Ingeniería y su relación con algunas variables socio demográficas., *Revista de investigación en psicología*, vol. 13, no 2, p. 139-151., 2010.
- [5] Hills y Laforge, En Sexton y Kasarda, 1992.
- [6] S. En Kao, 1989.
- [7] S. Villareal, Generación de Ideas a través de patentes libres, Bucaramanga, 2016.

- [8] M. Díaz, Producción tecnológica de América Latina con mayor visibilidad internacional: 1996- 2007. [Tesina para optar por el Diploma de Estudios Avanzados], Granada: Universidad de Granada, 2007.
- [9] A. J. M y H. C, Modelo de desarrollo de base tecnológica de Core del sur, 2016.
- [10] G. Carrion y I. Ruiz, Las patentes y las normas, documentos para la transferencia de tecnología, Investigación Bibliotecológica; 13(27): 180-94., 1999.
- [11] «Superintendencia de industria y Comercio.» de Patente de invención y Patente de modelo de Utilidad, Grupo Salmantica, 2008, p. 12.
- [12] Red Nacional de Emprendimiento. Encuesta a Emprendedores 2014
- [13] Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (2014)- Términos de Referencia “Concurso Estímulos Redes Regionales de Emprendimiento”. Op. Cit.
- [14] Organización Mundial de Propiedad Intelectual (OMPI). Libro Blanco ACSC, Oficina Europea de Tecnología e Innovación. What Innovation Is. How companies develop operating systems for innovation, p.19
- [15] R. Kaplan y D. Saccuzzo, Pruebas Psicológicas, Mexico: Thomson, 2006.
- [16] C. A. Adalberto y C. O. Heidi, «Scielo Salud pública,» 15 noviembre 2008. [En línea]. Available: <https://scielosp.org/pdf/rsap/2008.v10n5/831-839>. [Último acceso: 13 febrero 2018].
- [17] G. y M., «Universidad de Valencia,» 2003. [En línea]. Available: <https://www.uv.es/~friasnav/AlfaCronbach.pdf>. [Último acceso: 14 febrero 2019].

Identificación de las causas de variación en los procesos de esterilización de un hospital privado a través de la metodología Six SIGMA: Fases definir – medir

Ivanhoe Rozo R.¹

Ivon A. Vanegas R.²

Lizeth F. Serrano C.³

Mary A. Pérez M.⁴

Flor N. Díaz P.⁵

Universidad Católica de Colombia – Colombia

Este capítulo presenta los resultados de la implementación de las fases Definir, Medir y Analizar de la metodología Six SIGMA en uno de los tres métodos de esterilización de una central de esterilización de un hospital privado de la ciudad de Bogotá. La medición de la calidad en instituciones de salud ha sido uno de los pilares de la Política de Seguridad del Paciente y se orienta hacia la reducción de eventos adversos en el desarrollo de procedimientos médico-asistenciales de tipo ambulatorio, quirúrgico u hospitalario. La metodología corresponde a una visión integrada de negocio orientada hacia la excelencia operacional para la reducción de errores y defectos en un producto o servicio. La diseñada para el caso de estudio corresponde a un diseño cualitativo-descriptivo con enfoque inductivo donde se utilizan datos cuantitativos para dimensionar la situación actual e identificar la línea base del proceso. Los resultados indican que el proceso se encuentra en un nivel Sigma superior a 5, sin embargo, no se han identificado las causas que originan las devoluciones a causa del operario o por falla de las máquinas. En una posterior implementación se debe establecer la incidencia de las causas raíz identificadas en esta etapa y diseñar un plan de mejoramiento que permita reducir los errores en el proceso y asegurar que se controlan los costos de la no calidad y costos de la calidad del proceso. Asimismo, el diseño de un módulo integrado para la gestión del conocimiento en las actividades del proceso de esterilización se hace necesario para generar reportes diarios, y así apoyar y optimizar el proceso de toma de decisiones.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS) enfrentan importantes cambios en la gestión de sus procesos internos, siendo trascendental contar con actividades que generen valor a partir de la calidad, flexibilidad y capacidad para ofrecer respuestas inmediatas a los retos que plantea el entorno, y en particular para el cumplimiento de la Política de Seguridad del Paciente. En este sentido, el marco legal y normativo del sector salud ha contemplado un conjunto de directrices para la regulación y mejoramiento de las actividades de las IPS con el propósito de optimizar los recursos disponibles y facilitar la prestación del servicio.

Según el reporte de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) para Colombia, las compañías aseguradoras en el sistema de salud aún no se han convertido en compradoras efectivas y eficientes de los servicios de salud. De igual manera, el reporte menciona que convendría desarrollar un conjunto más amplio de normas de calidad en asistencia sanitaria y de directrices regulatorias de los servicios de atención primaria. Las recomendaciones de la OCDE para Colombia se fundamentan, en primer lugar, en el incremento de la cobertura del servicio de salud en la población colombiana a más del 96% y, en segundo lugar, en la potencialidad del sector para prestar servicios a nivel internacional como lo expone el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia a través del Programa de Transformación Productiva.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, las Infecciones Asociadas a la Atención en Salud (IAAS) se generan 100.000 muertes cada año a raíz de los procesos ineficientes de limpieza y desinfección de instrumental quirúrgico. De igual manera, las pérdidas económicas por este tipo de actividades con errores se estiman en más de USD \$9 millones de dólares que influyen directamente en el costo del servicio [1]. Las Centrales de Esterilización (CE) tienen un rol relevante en la cadena de valor en las organizaciones de salud debido a que proveen los materiales, instrumental y otros elementos para los procesos médicos, para el aseguramiento de la política de seguridad del paciente. Al realizar una revisión de la literatura sobre la aplicación de metodologías avanzadas en calidad como Six Sigma, Lean Six Sigma, Lean Healthcare y similares, se encontró que existen aplicaciones en procesos misionales orientados productividad y optimización de recursos, pero pocos documentos científicos para procesos como CE [2].

La aplicación de metodologías avanzadas en calidad como Six SIGMA (SS) ha logrado beneficios en diferentes sectores económicos, incluyendo procesos de manufactura y transaccionales, basándose en el ciclo de mejoramiento DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, por sus siglas en inglés). El objetivo de esta metodología es minimizar los defectos y errores focalizándose en los procesos más críticos de acuerdo con los requerimientos del cliente hasta obtener 3.4 o menos defectos por millón de oportunidades [3]. En la Tabla 1, se presentan valores correspondientes de defectos y su correspondiente valor de defectos por millón de oportunidades (DMPO) [4].

¹ irozo@ucatolica.edu.co

² iavanegas17@ucatolica.edu.co

³ lfserranoc@ucatolica.edu.co

⁴ mamendoza@ucatolica.edu.co

⁵ fn Diaz@ucatolica.edu.co

Tabla 1. Niveles sigma y Defectos por Millón de Oportunidades (DPMO)

σ level	Defect rate (%)	DPMO (n)
1	69.76120%	697612
2	30.87700%	308770
3	6.68100%	66810
4	0.62090%	6209
5	0.00034%	3.4

Este trabajo presenta los resultados de la aplicación de la metodología SS en las tres primeras fases: Definir, Medir y Analizar como resultados preliminares de adaptación del ciclo de mejora DMAIC en la organización en salud y en CE.

2. MÉTODO

2.1 Tipo de estudio

El tipo de estudio es cualitativo-descriptivo, con aplicación de método inductivo a partir del uso de variables cuantitativas para dimensionar el caso de estudio.

2.2 Diseño metodológico

El diseño metodológico propuesto en la Figura 1 consistió en la adaptación de las tres primeras etapas del ciclo DMAIC: Definir, Medir y Analizar. De acuerdo con la revisión de literatura realizada por Rozo et al [5], las fases establecidas para el diseño metodológico desde la Definición pretenden detallar el comportamiento de los procesos de la Central de Esterilización. Posteriormente, se emplearon elementos de la fase Medir a partir del uso de datos cuantitativos para dimensionar el problema, y finalmente se retoman actividades de la fase Analizar para la identificación preliminar de las causas de variación en los procesos de esterilización.

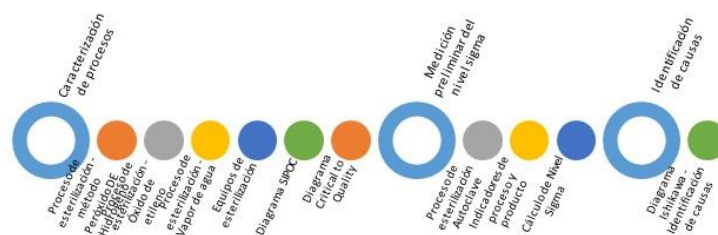


Figura 1. Diseño metodológico

2.3 Ciclo DMAIC

El ciclo Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC) fue concebido desde el ciclo Planear, Hacer, Verificar y Actuar (PHVA), incluyéndose una etapa de medición a partir de elementos estadísticos y no estadísticos sobre los procesos de negocio orientado hacia la excelencia operacional. Sus resultados están orientados en el mediano y largo plazo a partir del desarrollo de las siguientes actividades:

- *Definir:* Establecer el problema, priorizar el proyecto y analizar beneficios.
- *Medir:* Traducir el problema en variables medibles a través del CTQ.
- *Analizar:* Determinar las causas raíz que afectan los CTQ.
- *Mejorar:* Plantear y desarrollar mejoras al desempeño de los CTQ.
- *Control:* Implementar controles que permitan mantener las mejoras desarrolladas en el proceso y continuar nuevamente con la identificación de nuevos ciclos de mejora.

2.4 Descripción del caso de estudio

El caso de estudio se realizó en una institución de salud nivel IV de complejidad ubicada en la ciudad de Bogotá, que presta servicios de hospitalización, cirugía, consulta externa y apoyo diagnóstico. La institución está certificada en ISO 9001 y está acreditada en salud por el Ministerio de Salud. Cuenta con una central de esterilización que emplea tres métodos para desinfectar y esterilizar instrumentos e insumos médicos: peróxido de hidrógeno, óxido de etileno y autoclave. La central de esterilización cuenta con profesionales graduados en instrumentación quirúrgica y estudiantes en práctica, quienes participan de las actividades del proceso, quienes en total ascienden entre 10 a 30 trabajadores por turno diario de 12 horas.

El caso de estudio es una organización del sector salud de la ciudad de Bogotá, que cuenta con una unidad de esterilización habilitada por el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, que presta servicios a los procesos misionales relacionados directamente con el paciente. No obstante, la medición de indicadores en los procesos de la

Central de Esterilización se realiza de acuerdo con lo establecido en la normatividad legal vigente para el reporte ante el Ministerio de Salud y Protección Social y demás entidades gubernamentales de inspección y vigilancia, pero no se realiza el tratamiento y gestión de la mejora mediante metodologías avanzadas de calidad, dificultando el uso y gestión de conocimiento para la mejora de procesos de manera objetiva.

2.5 Plan de recolección de datos

La Central de Esterilización del Hospital Privado estudiado, cuenta con tres tipos de procesos de esterilización: Óxido de Etileno, Peróxido de Hidrógeno y Vapor de Agua (Autoclave). Cada uno de ellos es independiente y maneja diferentes parámetros de proceso a partir de indicadores de calidad como temperatura, presión, entre otros. Al analizar estos procesos por un período de 2 meses, se evidencia el uso de dos indicadores como lo muestra en la Tabla 2, sin embargo, no se cuenta con análisis de causa para ninguno de ellos.

Tabla 2. Indicadores actuales de la central de esterilización

Indicador	Fuente de Datos	Método de Recolección	Tiempo
Tasa de paquetes esterilizados devueltos por inconformidad	Central de Esterilización	Registro manual en carpetas	Diario
Número de cancelaciones de ciclos de equipo de esterilización	Central de Esterilización	Registro manual en carpetas	Diario

Para el desarrollo del presente proyecto se hará uso de la técnica Muestreo Aleatorio Estratificado en el cual se divide la población en subgrupos conocido también como estratos y se selecciona al azar una muestra de cada uno. Se tomará en cuenta la muestra de paquetes esterilizados como se plantea en la Tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de la muestra

Criterio	Óxido de etileno	Peróxido de hidrógeno	Autoclave
Tamaño de la población	8000	8000	8000
Fraccionamiento de muestra	1/24	1/24	1/24
Tamaño final de la muestra estimada	300	300	300

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización de los procesos de la Central de Esterilización

El caso de estudio corresponde a un hospital privado universitario ubicado en el centro de la ciudad de Bogotá, en el barrio La Estanzuela de la localidad de Los Mártires de la ciudad de Bogotá. Se funda en el año 1902 con el propósito de erigir un hospital que funcionara como centro de desarrollo para la cirugía, formación de docentes y solución de problemas asistenciales. Cuenta con los premios Mención a la Excelencia en la Prestación de Servicios de Salud otorgado por el Ministerio de Salud, reconocimiento como Hospital Universitario otorgado por la Comisión Intersectorial para el Talento Humano en Salud, Acreditación en Salud otorgada por el Ministerio de Salud y el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) y certificación de calidad ISO 9001 otorgada por la misma entidad. El proceso de esterilización es considerado un proceso de apoyo desde el sistema de Información Almera, donde se almacenan los registros de las actividades del proceso y se dispone de la información documentada del Sistema de Gestión de la Calidad, como se presenta en la Figura 2.

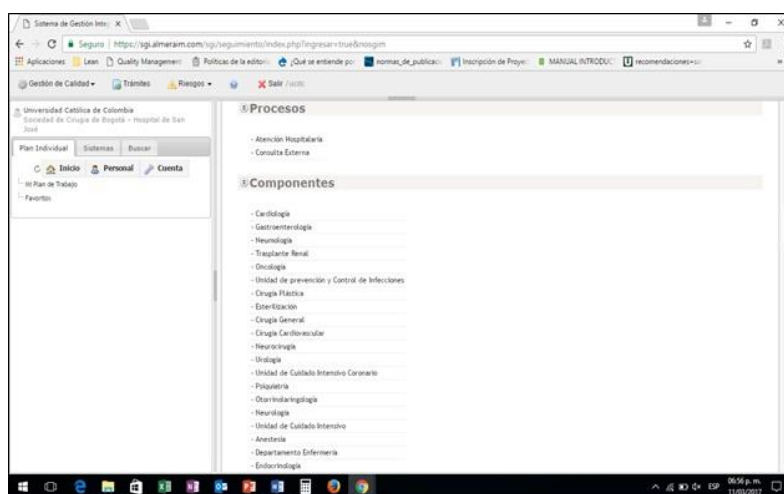


Figura 2. Sistema de Gestión de la Calidad

La Central de Esterilización está ubicada estratégicamente cerca de las salas de cirugía, sin embargo, puede apoyar el proceso hospitalario y otros procesos que requieran insumos o instrumentos descontaminados y esterilizados. En la Figura 3 se presenta la distribución de planta de la CE.

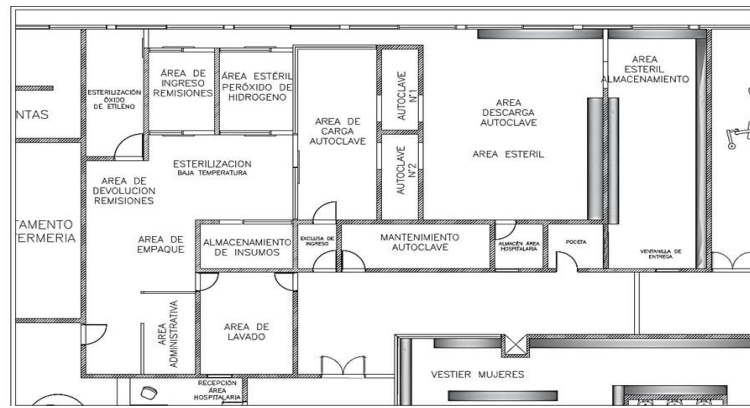


Figura 3. Distribución de planta Central de Esterilización

En la actualidad la Central de Esterilización presta sus servicios a los procesos ambulatorios, de urgencias y hospitalarios del Hospital privado de Bogotá diariamente durante todo el año. Gestiona el recibo, desinfección, procesamiento, control y distribución de textiles (ropa, gasas, apósitos, etc.), equipamiento biomédico e instrumental esterilizado en óptimas condiciones a todos los servicios del hospital para ser utilizado en el paciente.

Cuenta con los procesos de esterilización de Óxido de etileno, Peróxido de Hidrógeno y Autoclave (Vapor de agua) para esterilizar la ropa y los instrumentos utilizados en los procedimientos médicos y, por otra parte, tiene procesos subcontratados con una lavandería industrial que presta el servicio de lavado y doblado de ropa sobre el cual se ejercen controles periódicos de los productos que llegan a la CE. El proceso inicia desde la recepción de material contaminado e inactivo por detergentes enzimáticos hasta la entrega del producto esterilizado y validado por indicadores biológicos o químicos. Los servicios de lavandería están subcontratados y culmina con la custodia y almacenamiento de los elementos ya esterilizados.

La institución cuenta con procedimientos operativos documentados en el Sistema de Gestión de Calidad, dentro de los cuales específicamente tres, hacen referencia a cada método de esterilización describiendo las actividades a desarrollar para cada ciclo, con la finalidad de garantizar que las actividades sean estandarizadas y cumplidas por todos los operarios asignados al proceso. Actualmente, en la central de esterilización del Hospital se realizan tres procesos de esterilización los cuales operan las 24 horas del día, los 365 días de año y se describen a continuación:

3.1.1 Proceso de Esterilización – Método Peróxido de Hidrógeno

Este método se encarga de esterilizar los instrumentos para inactivar microorganismos de manera rápida y eliminar residuos peligrosos por medio de gas plasma y peróxido de hidrógeno a bajas temperaturas y en tiempos de proceso inferior a una hora; usualmente es utilizado para cargas de instrumentos o elementos termolábiles y sensibles a la humedad. Las generalidades del proceso se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Ficha general proceso peróxido de hidrógeno

Proceso	Peróxido de hidrógeno
Descripción	Eliminación de formas vivas de microorganismos incluyendo formas esporuladas.
Duración ciclo	Depende del ciclo y del equipo
Etapas	1. Vacío inicial (25 min): extracción de aire. 2. Inyección de Peróxido de Hidrógeno (H ₂ O ₂): liberación de agente químico y vaporización en la cámara. 3. Difusión: Contacto de H ₂ O ₂ con la carga a esterilizar. 4. Plasma: Activación de campo magnético (radiofrecuencia), que transforma la molécula de H ₂ O ₂ en plasma.
Equipos	Sterrad 100S y Sterrad NX
Material	1. Instrumental o dispositivo médicos apto para el método de esterilización 2. Cinta testigo de peróxido de hidrógeno 3. Ampolla bilógica (Geobacillus stearothermophilus de segunda generación) 4. Indicador químico 5. Libro de registros de cargas 6. Tira de impresión 7. Cassete para Sterrad 100 (azul) o Sterrad NX (verde)
Preparación del proceso	1. Transporte del material antes del ingreso al servicio de esterilización 2. Recibido de material 3. Lavado, secado y lubricación 4. Empaque 5. Esterilizado 6. Almacenaje y entrega
Personal requerido	1. Auxiliar de enfermería 2. Coordinador de esterilización
Protección requerida	1. Tapabocas 2. Guantes 3. Blusa de protección.

3.1.2 Proceso de Esterilización – Método Óxido de Etileno

Este es un proceso en donde se utilizan bajas temperaturas, las cuales no superan los 60°C. Basado en la difusión de gas Óxido de Etileno, esterilizando los instrumentos y capaz eliminar los microorganismos, es el más conocido a nivel mundial utilizado para los elementos termosensibles los cuales no pueden ser esterilizados con métodos como el vapor o el calor. Las generalidades del proceso se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Ficha general proceso óxido de etileno

Proceso	Óxido de Etileno
Descripción	Eliminación de microorganismos
Duración ciclo	10- 12 horas
Tapas	1. Pre-acondicionamiento (45 – 60 min): El esterilizador establece la Ttemperatura de la cámara, el vacío y la humedad. 2. Exposición al gas (60 min): Se perfora la ampollita de óxido de etileno y penetra la carga 3. Aireación (8 horas): Retirar los excesos de óxido de etileno del instrumental y paquetes
Equipos	Steri-Vac 3M (ETO)
Material	1. Registro instrumental a esterilizar en Oxido Etileno 2. Canasta Superior e inferior del esterilizador 3. Cinta testigo para calor húmedo 4. Agua destilada 5. Papel de impresión 6. Indicador químico externo (cinta) para oxido etileno 7. Indicador químico interno 8. Indicador biológico Bacillus Atrophaeus
Preparación del proceso	1. Transporte del material antes del ingreso al servicio de esterilización 2. Recibo de material 3. Lavado, secado y lubricación 4. Empaque 5. Esterilizado 6. Almacenaje y entrega
Personal requerido	1. Auxiliar de enfermería 2. Coordinador de esterilización
Protección requerida	1. Tapabocas 2. Guantes 3. Blusa de protección.

3.1.3 Proceso de Esterilización – Método Autoclave o Vapor de Agua

La esterilización a vapor se da a través de la acción del calor húmedo por desnaturalización de las proteínas. La autoclave tiene la ventaja de producir un elevamiento de temperatura en forma rápida por encima de 100°C en cortos tiempos de esterilización y de no dejar residuos tóxicos en el material. Las generalidades del proceso se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Ficha general proceso Calor Húmedo o Autoclave

Proceso	Por calor Húmedo o Autoclave
Descripción	Eliminación de formas vivas de microorganismos incluyendo formas esporuladas.
Duración ciclo	Depende del material a esterilizar
Etapas	1. Pre calentamiento: abrir válvula de admisión de calor 2. Entrada de vapor: se permite la entrada de calor a la cámara 3. Inicio de ciclo: una vez el vapor ocupa totalmente la cámara se da inicio al ciclo 4. Expulsión de líquido: se expulsa el vapor de la cámara 5. Secado: se da el secado mediante succión de aire al entrar en contacto con la atmosfera.
Equipos	STERIS AMSCO CENTURY V-1262 PREVAC, AUTOCLAVE HIGH SPEED 1606
Material	1. Instrumental o material acto para su esterilización 2. Cinta testigo para calor húmedo 3. Ampolla biológica (Geobacillus stearothermophilus) 4. Libro de registro de carga
Preparación del proceso	1. Transporte del material antes del ingreso al servicio de esterilización 2. Recibido de material 3. Lavado, secado y lubricación 4. Empaque 5. Esterilizado 6. Almacenaje y entrega
Personal requerido	1. Auxiliar de enfermería 2. Coordinador de esterilización
Protección requerida	1. Tapabocas 2. Guantes 3. Blusa de protección.

A continuación, la Figura 4 muestra de manera general el recorrido que realiza el instrumental al interior de la central de esterilización abarcando seis grandes procesos como son traslado, recibo, preparación, empaque, esterilización y almacenaje.

Ciclo General de Esterilización de Instrumental



Figura 4. Ciclo general de esterilización de instrumental

3.1.4 Equipos de esterilización

La esterilización comprende todos aquellos procedimientos por los que cualquier forma de vida microbiana, vegetativa o esporulada se destruye, la desinfección es un procedimiento que solo causa la destrucción de las formas vegetativas y no afecta a las esporas, por tal motivo, la esterilización es un método efectivo para la destrucción de estos agentes. Los equipos juegan un papel importante, ya que cada uno tiene determinadas características que permiten o no esterilizar unos materiales u otros; por tanto, la central en su labor diaria debe velar por mantener estos equipos en buenas condiciones, llevando a cabo una adecuada manipulación y haciendo cumplir el programa de mantenimiento. A continuación, se describen los equipos utilizados para la esterilización de materiales. La Tabla 7 presenta la clasificación de los equipos por método de esterilización con los que cuenta la central.

Tabla 7. Relación método de esterilización – equipo

Tipo método	Nombre del Método	Nombre de Equipos
Método con Baja temperatura	Peróxido de hidrógeno	V-Pro 1Plus
		V-ProTM 60
		Sterrad NX ASP
Método con Alta temperatura	Óxido de etileno	Steri-Vac 5 XL 3M
	Autoclave	Steris Amsco Century V-1262 PREVAC (2 equipos)

3.1.5 Diagrama SIPOC – Proceso Esterilización

El diagrama SIPOC presentado en la Figura 5 esboza los proveedores, entradas, actividades del proceso, salidas y clientes del proceso de esterilización, permitiendo caracterizar la gestión del proceso para identificar interacciones entre los procesos del negocio [5].

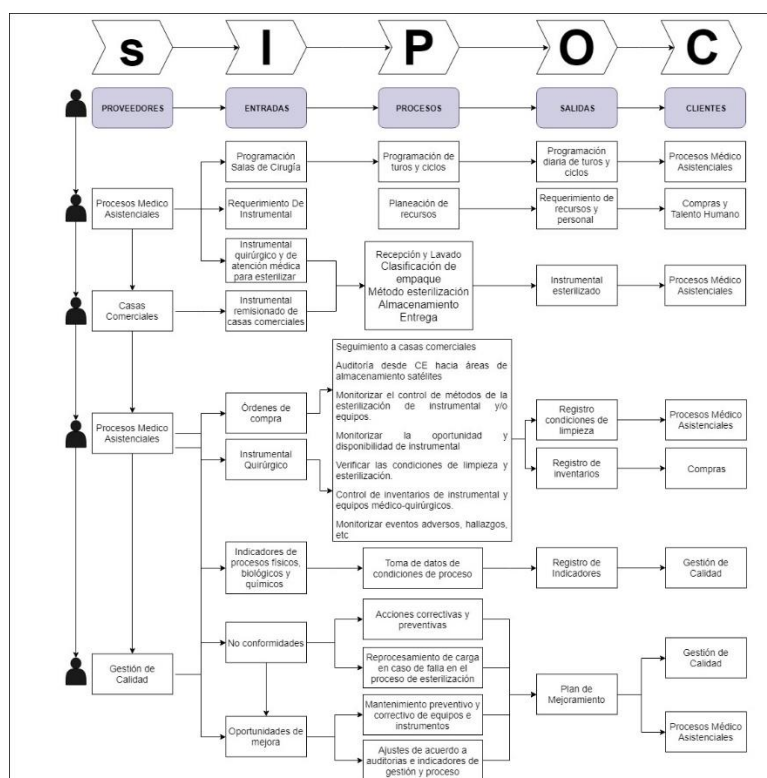


Figura 5. Diagrama SIPOC Hospital Privado

3.1.6 Critical to Quality (CTQ)

El CTQ corresponde a los parámetros críticos de calidad que relacionan los deseos y necesidades del cliente o proceso [6]. Durante el seguimiento realizado a los procesos de esterilización se desarrollaron entrevistas con el cliente interno, como parte interesada en recibir y usar el instrumental para los procesos médico-asistenciales en los pacientes. Esta información se utilizó para identificar los requerimientos y necesidades frente a la utilización de este en la atención con el paciente. A partir de esto, se construye el diagrama CTQ el cual detalla como necesidad principal, “Garantizar la calidad de los procesos de la central”, en donde se requiere contar con la disponibilidad del material médico quirúrgico para abarcar la demanda, en las condiciones óptimas para su uso, haciendo uso de equipos que respondan eficientemente en las operaciones de esterilización. Estos criterios fueron tomados en cuenta para conocer las métricas que se emplean actualmente en el proceso, asociarlas a la medición. A continuación, la Figura 6 presenta el CTQ.

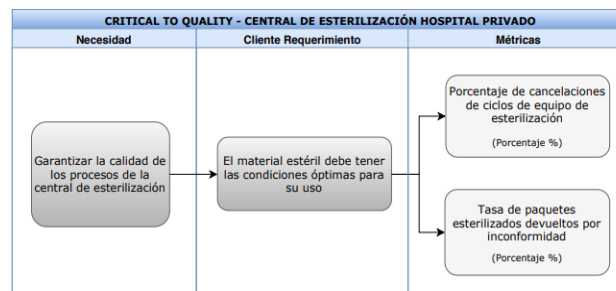


Figura 6. Diagrama Critical To Quality (CTQ)

Garantizar la calidad de los procesos en la central de acuerdo con el cliente, incluye tener en cuenta el siguiente requerimiento de alto impacto:

- *El material estéril debe tener las condiciones óptimas para su uso.* Los instrumentos correctamente esterilizados, proporcionan confianza y protección ante infecciones para los pacientes y personal clínico, por lo que es fundamental asegurarse de que el material cumple con las condiciones, es decir, ha pasado por un proceso de desinfección y se asegura que está libre de microorganismos que puedan transmitirse a otra persona en el momento del uso del instrumental. Para este caso, las métricas a utilizar estarán dadas por información que se controla al interior de la central como lo es, el porcentaje de cancelaciones de ciclos de equipo de esterilización y la tasa de paquetes devueltos por inconformidad; estos dos indicadores, permiten establecer las ocasiones en las que el instrumental no ha reunido las condiciones para ser usado en los procesos médico asistenciales ya sea porque el proceso no cumple con el ciclo de esterilización completo y/o porque es devuelto por alguna inconformidad detectada al momento de su uso.

A través de este requerimiento se hace visible en gran medida el volumen de material manejado de la empresa, los costos de reprocesos y en consecuencia la afectación de la calidad del servicio del producto y del cliente final, en este caso, los pacientes.

3.2 Identificación del proceso crítico en la Central de Esterilización

Alcanzar un nivel de excelencia en cualquier proceso, requiere tener en cuenta factores tales como: las instalaciones donde se ejecutan las actividades, la formación y competencias del personal clínico, los procedimientos y lineamientos establecidos y el acompañamiento de los procesos de soporte, siendo capaces de cumplir con la entrega de un material esterilizado bajo los mismos parámetros y responsabilidad. Para identificar de manera precisa la línea de esterilización de mayor impacto en la central, se toma en cuenta dos variables determinantes como son el costo y el volumen de producción por método. Considerando “*los costos*” como primera variable de estudio, hoy en día, es buena práctica para las empresas de servicios y de forma puntual las del sector salud, contar con un sistema de costos para determinar cuánto les cuesta el servicio que están prestando y de esta manera apoyarse para fijar los precios de venta a la unidad de servicio [9].

Para un área como la central de esterilización es prudente contar con costos por actividad donde se define el conjunto de tareas directas que son necesarias para la prestación del servicio, pues estas actividades vía proceso son las que convierten las necesidades dadas por un cliente a un servicio prestado [10]. El costeo basado en actividades permite visualizar el impacto en la prestación del servicio, hallar mejoras en los métodos de trabajo, rediseñar la cadena de valor, entre otros más beneficios que actualmente la central de esterilización está dejando de gestionar por no contar con un sistema de costos. Autores [11] mencionan la importancia de los costos radica en poder cuantificarlos de manera confiable y metódica con el fin de establecer cuáles son los gastos que tiene la empresa, en este caso conocer los gastos que genera la central de esterilización, en fallas, reprocesos, malos procedimientos etc., a los cuales se le denominan costos de no calidad. Indagando al interior de la central de esterilización se ha evidenciado que no se

cuenta con la medición de los costos en los que se incurre durante las actividades necesarias para la esterilización de instrumentos, que van desde el área de lavado hasta el empaque y almacenamiento del producto; por lo cual no es posible analizar a través de esta variable el impacto de los costos en la esterilización de instrumentos.

El hospital debe reconocerse como una empresa de servicios, que combina factores de producción y produce el servicio de asistencia sanitaria” [12] por lo que ha de considerarse al proceso de esterilización de instrumentos un proceso intermedio (off-line), es decir, es un proceso necesario para la obtención de un resultado final, en este caso el alivio o mejora de la salud del paciente, pero que no se ejercen de forma directa sobre él y por su naturaleza deben obedecer a técnicas estandarizable. Los procesos al interior de la central deben controlarse para determinar su eficiencia clínica con las técnicas tradicionales de gestión industrial, es así como se revisa la segunda variable de medición “*el volumen de producción*” por método de esterilización, en tanto que, a través de esta, es posible entender la relación entre la cantidad de bienes o servicios producidos y los recursos utilizados; finalmente obtener un concepto de rendimiento por método de esterilización.

Al Sistema de Gestión de Calidad de la central, pertenecen los registros de proceso, donde se halla la información de la cantidad de instrumentos que se esterilizaron en un día, por turno, por ciclo y por método, responsable y demás características de proceso. El personal clínico tiene el deber de completar este registro durante su jornada laboral y dejarlo en las carpetas de cada equipo. Con la ayuda de los auxiliares de esterilización se lleva a cabo la revisión de los registros de indicadores consolidados por año, tomando en cuenta datos de tres años consecutivos 2016, 2017 y 2018. Las Tablas 8 y 9, y las Figuras 7 y 8 presentadas a continuación muestran los datos recopilados durante el análisis de información para las variables manejadas en el área: *Número de ciclos*: cantidad de ciclos realizados por método de esterilización, y *Número de paquetes*: cantidad de paquetes que pasaron por proceso de esterilización.

Tabla 8. Número de ciclos por método

Año	Baja Temperatura		Alta Temperatura
	Peróxido de Hidrógeno	Óxido de Etileno	Calor Húmedo Autoclave
2016	2.439	187	5.078
2017	4.915	139	5.439
2018	4.960	162	5.688

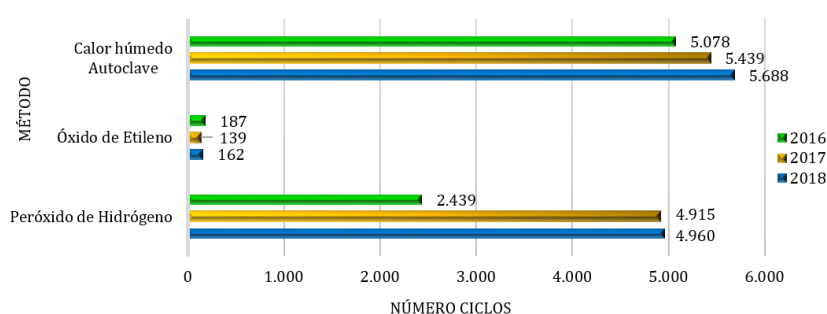


Figura 7. Número de ciclos por método

Tabla 9. Volumen de paquetes por método

Año	Baja Temperatura		Alta Temperatura
	Peróxido de Hidrógeno	Óxido de Etileno	Calor Húmedo Autoclave
2016		51.495	174.303
2017		49.883	174.881
2018		50.306	184.958

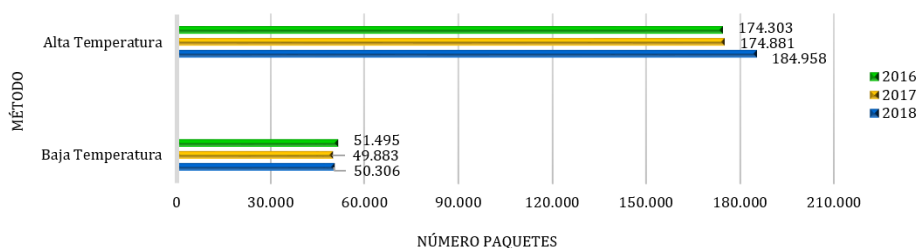


Figura 827. Volumen de paquetes por método

Esta depuración de datos sirve como referencia inicial para señalar que el proceso de esterilización de alta temperatura (autoclave) supera a los de baja temperatura en los equipos por método de esterilización de peróxido de hidrógeno y óxido de etileno, en cuanto a cantidad de ciclos realizados y número de paquetes esterilizados. Se establece bajo este concepto como la línea crítica de la central, y el proceso sobre el cual se realizarán las mediciones correspondientes.

3.3 Fase Medición

3.3.1 Proceso de esterilización Autoclave

Con base en los resultados de la fase Definir, el proceso prioritario sobre el cual se realizó la medición del nivel de calidad sigma fue el de Autoclave. De acuerdo con los procedimientos documentales establecidos por la Central de Esterilización, los criterios de aceptación de una carga esterilizada no deben liberarse para disposición de los procesos médico-asistenciales cuando: *Son elementos de medida incorporados al esterilizador, tales como termómetros, manómetros de presión (barómetros), cronómetros, sensores de carga, válvulas y sistemas de registro de parámetros, entre otros* [13]. Una vez se ejecuta el ciclo, los equipos generan una tirilla con las características del proceso en las diferentes etapas. Cuando el material a esterilizar no alcanza las condiciones adecuadas del ciclo elegido para la carga, la tirilla emite un aviso en negro que indica que el ciclo es cancelado, es decir no cumple con los parámetros establecidos por lo cual no debe hacerse uso de dicho material. La Figura 9 presenta un ejemplo de ciclo cancelado y ciclo terminado.

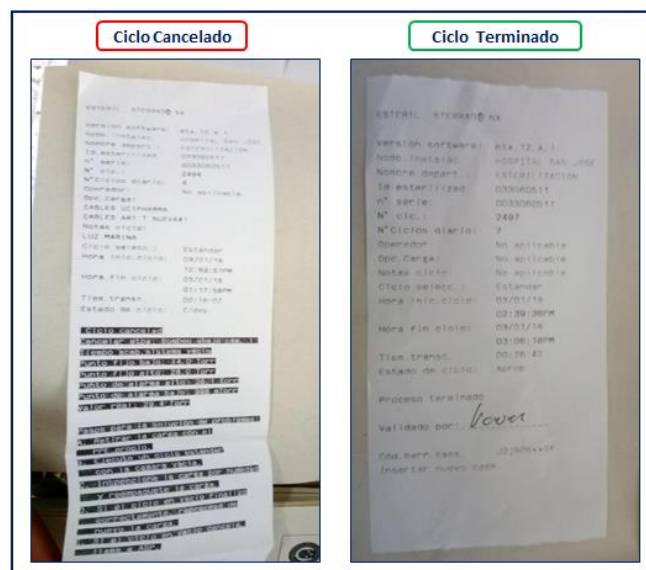


Figura 9. Tirilla parámetros de equipo

- **Monitores Químicos Externos:** Son cintas adhesivas impregnadas con tinta termoquímica que cambia de color cuando es expuesta a una temperatura determinada. En caso de que el indicador no arroje ningún color se asume que los paquetes no fueron expuestos a las condiciones físicas presentes en el esterilizador cuando la cinta no cambia de color, por lo tanto, el proceso de esterilización ha sido incorrecto. Los instrumentos y/o equipos no son óptimos para su uso. La Figura 10 presenta un ejemplo del monitor químico externo antes y después del ciclo.

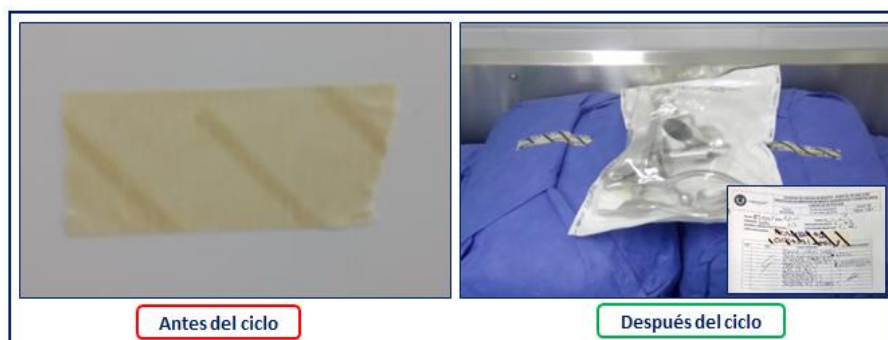


Figura 1028. Cinta adhesiva de comprobación

- **Monitores Químicos Internos:** Corresponde a una tira de papel impregnado con tinta termocrómica, que cambia de color cuando ha sido expuesta a las condiciones mínimas necesarias del método. Los paquetes no se usan si el Indicador Químico Interno sugiere proceso inadecuado, es decir, no cambia de color. Esto se puede evidenciar en la Figura 11.
- **Monitores Biológicos:** Es el medio disponible para confirmar la esterilización de un artículo o para determinar la efectividad del proceso de esterilización. Si la respuesta del indicador biológico es positiva (cambia de color) denota que se hallan microorganismos después del proceso de esterilización, por tanto, el material no es apto. En la Figura 12 se presenta un ejemplo de monitor biológico.



Figura 11. Tira de papel de comprobación

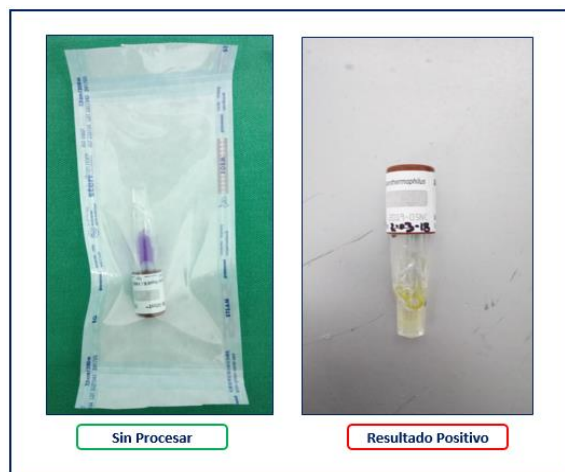


Figura 12. Indicador biológico

- *Indicador Específico Bowie Dick (B&D):* Es el método para evaluar la eficacia del sistema de vacío de autoclave de pre-vacío, cuya finalidad consiste en demostrar la ausencia de aire u otros gases no condensados en la cámara de esterilización. Cuando el cambio de color de la prueba no es uniforme en toda la hoja deberá repetirse la prueba y en caso de volver a salir mal, no se podrá hacer uso del equipo. En la Figura 13 se presenta un ejemplo de indicador Bowie Dick sin procesar y otro con resultado de prueba correcta.

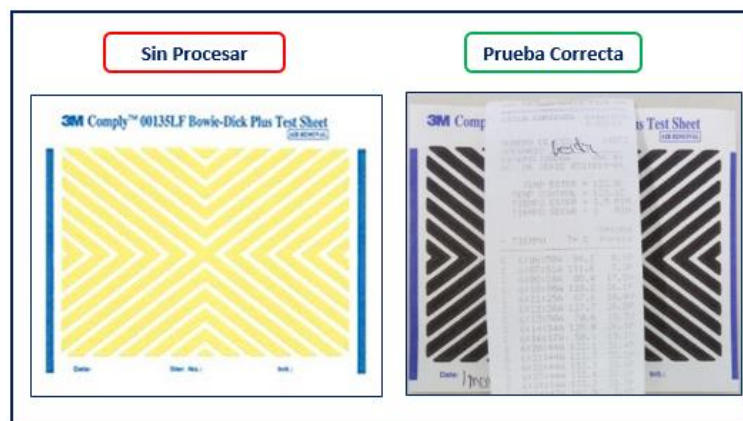


Figura 13. Indicador específico Bowie Dick

Bajo los requerimientos de calidad, el área de esterilización posee diversos registros que permiten el control de las variables implicadas en el proceso, donde están inmersos los resultados de los controles anteriormente descritos; el registro de las actividades permite llevar los procesos a una gestión adecuada y mejora continua. El equipo de trabajadores de la central ha elaborado de acuerdo con su proceso, los registros de cargas del método autoclave y de resultados de indicador biológico, siendo esta documentación el punto de partida para recopilación de datos acerca de fallas o procesos incorrectos de esterilización presentados desde el año 2016 hasta el año 2018.

En la Figura 14 se presenta un registro diligenciado cada vez que se va a iniciar un ciclo en la autoclave, en este se estipulan los parámetros de inicio de ciclo indicando el turno, la operaria que realiza el ciclo, si se incluye indicador biológico, si se realiza prueba de Bowie Dick y los instrumentos a esterilizar. Una vez finaliza el ciclo, el monitor químico (cinta adhesiva) se coloca en el registro para evidenciar que los paquetes han sido esterilizados correctamente.

SOCIEDAD DE CIRUGIA DE BOGOTÁ - HOSPITAL DE SAN JOSÉ PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE MÉDICO QUIRÚRGICOS Y HOSPITALARIOS			
CARGAS DE AUTOCLAVE			
Código AH-FO-203	Fecha de Aprobación 31 de marzo del 2015	Versión: 03 Página: 1 de 1	
FECHA: 27/03/2015	HORA: 7:35	TURNOS: M <input checked="" type="checkbox"/> T <input checked="" type="checkbox"/> N <input type="checkbox"/>	INDICADOR BIOLÓGICO: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>
OPERARIA: MORELO	NUMERO CONSECUTIVO DE CARGA: 05	CICLO PRUEBA BOWIE DICK: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>	
CINTA INDICADORA: Autoclave 2 de 6			
CANT	ROPA	EQUIPO / REMISIONES	INSTRUMENTAL ACCESORIO
4	PAQ. ESPALMA		4 P. 2035 UTK/138
3	PAQ. GATTO		
6	5.30.003		

Figura 14. Registro de cargas autoclave

- AD-FO-43 Registro de lectura de indicadores biológicos – Autoclave: Cuando se ha incluido la prueba de indicador biológico durante el ciclo, el resultado se deja como registro en el documento AD-FO-43, indicando que cámara de autoclave fue usada, operaria, fecha y hora, como se presenta en la Figura 15.

SOCIEDAD DE CIRUGIA DE BOGOTÁ - HOSPITAL DE SAN JOSÉ APOYO DIAGNÓSTICO Y TERAPÉUTICO			
REGISTRO LECTURA DE INDICADORES BIOLÓGICOS			
Código AD-FO-43	Fecha de Aprobación 08 OCTUBRE DE 2013	Versión: 4 Página: 1 de 1	
FECHA: 27/03/15	OPERARIA QUE INCUBA IN: MORELO	FECHA: 27/03/15	OPERARIA QUE INCUBA IN: MORELO
HORA DE INCUBACIÓN: 7:45	HORA SALIDA RESULTADO: 9:00	HORA DE INCUBACIÓN: 7:30	HORA SALIDA RESULTADO: 8:30
OPERARIA QUE VALIDA RESULTADO: MORELO	AUTOCLAVE N°: 2	OPERARIA QUE VALIDA RESULTADO: MORELO	AUTOCLAVE N°: 2
STERILAD NX <input checked="" type="checkbox"/> STERIVAC <input type="checkbox"/>	VPRO <input type="checkbox"/>	STERILAD NX <input checked="" type="checkbox"/> STERIVAC <input type="checkbox"/>	VPRO <input type="checkbox"/>
LECTURA: 1 HORA <input checked="" type="checkbox"/> TRES HORAS: 24 HORAS <input type="checkbox"/>	LECTURA: 1 HORA <input checked="" type="checkbox"/> TRES HORAS: 24 HORAS <input type="checkbox"/>	LECTURA: 1 HORA <input checked="" type="checkbox"/> TRES HORAS: 24 HORAS <input type="checkbox"/>	LECTURA: 1 HORA <input checked="" type="checkbox"/> TRES HORAS: 24 HORAS <input type="checkbox"/>
NEGATIVA <input checked="" type="checkbox"/> POSITIVA <input type="checkbox"/>	NEGATIVA <input checked="" type="checkbox"/> POSITIVA <input type="checkbox"/>	NEGATIVA <input checked="" type="checkbox"/> POSITIVA <input type="checkbox"/>	NEGATIVA <input checked="" type="checkbox"/> POSITIVA <input type="checkbox"/>
ETIQUETA		ETIQUETA	

Figura 15. Registro de lectura de indicadores biológicos

- AH-FO-128 Registro entrada y salida instrumental e insumos a las salas de cirugía: Los instrumentos enviados a salas de cirugía se registran con su respectiva prueba de uso seguro, en este registro AD-FO-128, como se presenta en la Figura 16.

SOCIEDAD DE CIRUGIA DE BOGOTÁ - HOSPITAL DE SAN JOSÉ APOYO DIAGNÓSTICO Y TERAPÉUTICO	
REGISTRO ENTRADA Y SALIDA INSTRUMENTAL E INSUMOS A SALAS DE CIRUGÍA	
Código AH-FO-128	Fecha de Aprobación 2 de Noviembre del 2011
REGISTRO INDICADORES DE PROCESO (QUÍMICOS)	
RESPONSABLE DE LA LECTURA	
EQUIPOS, INSTRUMENTAL ACCESORIO, PAQUETES DE ROPA Y ACCESORIOS DE ROPA RETORNADOS DE SALAS DE CIRUGIA SIN ABRIR (ESTERILES)	
ELEMENTO	CANTIDAD (EN NUMEROS)

Figura 1629. Registro de entrada y salida instrumental e insumos a las salas de cirugía

3.3.2 Indicadores Central de Esterilización

Durante el levantamiento de información se evidencia que el equipo que opera los procesos de esterilización en las máquinas de autoclave ha establecido que los tipos de causas que generan la cancelación de un ciclo o devolución por inconformidad pueden estar dadas por falla del operario o por falla de la máquina. El registro de casos diario en el formato AH-FO-203 Registro Cargas de autoclave permitirá establecer cuál de estas causas está generando mayor impacto en el proceso. Para ello, se tomó como referencia el Diagrama CTQ expuesto en la Figura 17.

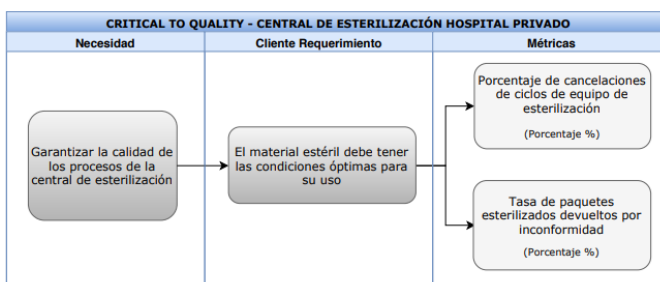


Figura 1730. Diagrama CTQ - Material estéril en condiciones óptimas de uso

A continuación, se realiza el análisis de datos para cada métrica especificando causa por operario y causa por máquina, también se ha elaborado la ficha para cada indicador, así como la tabla de datos para el análisis y su respectiva gráfica. De esta manera se desea concluir cuál causa es la que más se genera y tiene como efecto que el material estéril no cumpla con las condiciones óptimas de uso para los procesos medico asistenciales.

- *Indicador porcentaje de cancelaciones de ciclos de equipo de esterilización utilizando Autoclave.* En la Figura 18 se presenta la tendencia de cancelaciones de ciclo inferior al 0,50% a excepción del año 2016 para los períodos de junio, julio y agosto y el año 2017 específicamente en el mes de abril donde se evidencia un incremento de cancelaciones que llega a ser del 2%. De manera general en los 33 meses evaluados las cancelaciones no sobrepasan la meta para el indicador que corresponde a número de cancelaciones inferior al 5%. Si bien los datos para este indicador son referentes a fallas de operario y de esta manera se registraron, no se especifican las razones por las cuales el operario ha incurrido en una falla, lo que no permite mostrar claramente los problemas que generaron las cancelaciones y enfocar planes de acción a seguir.

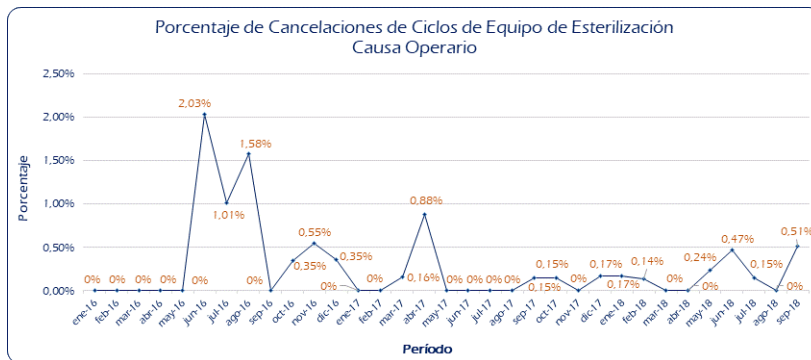


Figura 1831. Porcentaje de cancelaciones de ciclo – Causa operario

Debido a que en los registros no se hallan las razones de falla de operario, se ha indagado con los auxiliares y ellos han informado de manera verbal que hacía los meses donde hubo aumento de cancelaciones de ciclo, específicamente a mitad de año de 2016, se presentó alta rotación del personal en la central, lo que generó que se omitieran algunas consideraciones por parte de los auxiliares, para llevar a cabo la esterilización de manera correcta. En la Figura 19, se presenta el porcentaje de cancelaciones de ciclos de equipo de esterilización causa máquina.

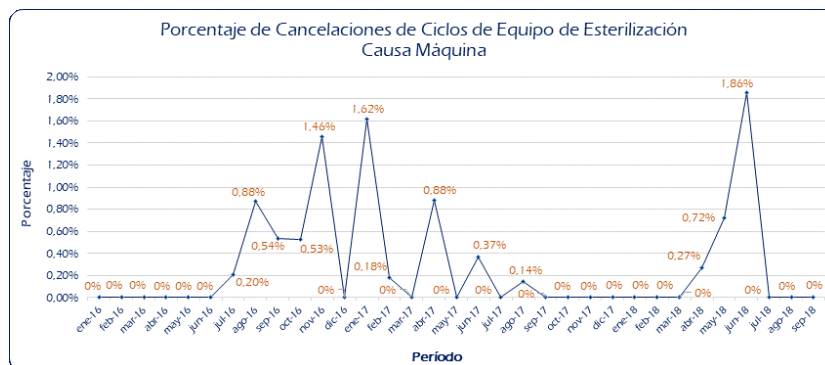


Figura 19. Porcentaje de cancelaciones de ciclo – Causa máquina

Se concluye que el indicador presenta desde mediados del año 2016 hasta mitad de 2017 un proceso de esterilización con gran variabilidad respecto a las cancelaciones de ciclo, donde se observa que por solo tres meses de ese período el proceso no presentó cancelaciones; posteriormente se llega a una estabilidad de cero cancelaciones desde septiembre de 2017. Esta tendencia se mantuvo hasta marzo del año 2018, pues en abril se evidenció un incremento progresivo de cancelaciones hasta el mes de julio, alcanzando el pico más alto en junio de 2018. Sin embargo, estos registros no sobrepasan el 5% de cancelaciones que corresponde a la meta de este indicador. Durante la revisión de los registros se evidencia que no se tiene información asentada del por qué se han presentado las fallas técnicas es decir de máquina, causando que no se tenga claridad respecto a los problemas por los cuáles se presentan las cancelaciones y enfocar planes de acción a seguir.

- *Indicador tasa de paquetes estériles devueltos por inconformidad.* El indicador mide el porcentaje de paquetes estériles devueltos por inconformidad sea por falla del operario o por fallo de máquina, y su meta de producto no conforme se estableció menor al 5%. Se analizaron los datos mensuales desde enero de 2016 a septiembre de 2018 utilizando las variables de número total de paquetes esterilizados y el número de paquetes devueltos. El comportamiento del indicador se presenta en la Figura 20.

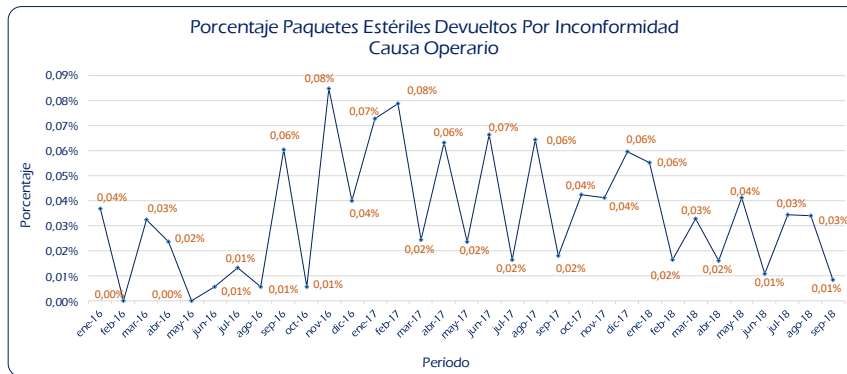


Figura 2032. Porcentaje paquetes estériles devueltos por inconformidad – Causa operario

De acuerdo con los datos obtenidos de la medición se establece que la causa de producto no conforme por causas de operario. En la Figura 21 se presenta el comportamiento del indicador porcentaje de paquetes estériles devueltos por inconformidad causa-máquina.

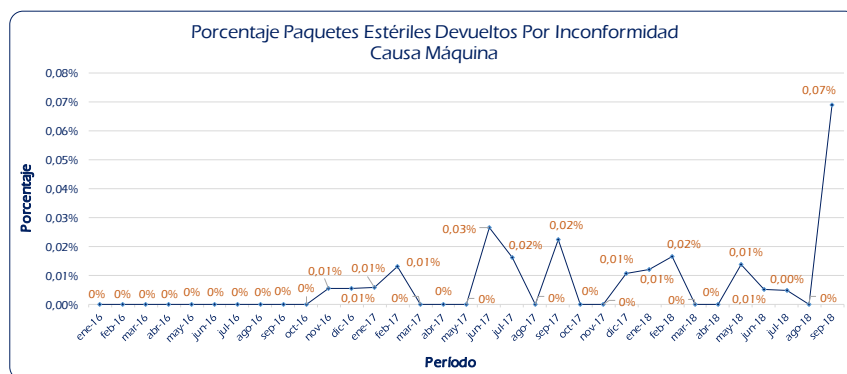


Figura 21. Porcentaje paquetes estériles devueltos por inconformidad – Causa máquina.

El indicador muestra a partir de noviembre de 2016 hasta septiembre de 2018 una tendencia a presentar devoluciones de instrumental, la variabilidad se presenta al no cumplir con los parámetros de máquina o condiciones técnicas adecuadas para la esterilización, a pesar que este indicador presenta su punto más alto en agosto de 2018 se cumple con la meta establecida de no superar el 5% de devoluciones por inconformidad, sin embargo no es del todo claro como en los casos anteriores, cuáles fueron las causas de falla que se presentaron en la máquina y de esta manera establecer las medidas oportunas.

3.3.3 Nivel Sigma de la línea crítica

Para cada indicador se calculó el nivel sigma para los años 2016, 2017 y 2018 como se presenta a continuación en las Tablas 10, 11 y 12.

Tabla 10. Resumen cálculo nivel six sigma año 2016

Indicador	DPMO	DPO	YIELD	Nivel Sigma
DI-Operario	92	0,000092	99,9908%	5.2
DI-Máquina	10	0,000010	99,9990%	5.7
CC-Operario	73	0,000073	99,9927%	5.3
CC-Máquina	29	0,000029	99,9971%	5.5

Tabla 111. Resumen cálculo nivel six sigma año 2017

Indicador	DPMO	DPO	YIELD	Nivel Sigma
DI-Operario	166	0,000166	99,9834%	5.1
DI-Máquina	78	0,000078	99,9922%	5.2
CC-Operario	59	0,000059	99,9941%	5.3
CC-Máquina	8	0,000008	99,9992%	5.8

Tabla 12. Resumen cálculo nivel six sigma año 2018

Indicador	DPMO	DPO	YIELD	Nivel sigma
DI-Operario	102	0,000102	99,9898%	5.1
DI-Máquina	151	0,000151	99,9849%	5.1
CC-Operario	72	0,000072	99,9928%	5.3
CC-Máquina	12	0,000012	99,9988%	5.7

De acuerdo con los datos clasificados se procede a establecer la relación de fallas de operario y máquina por cada indicador, con el propósito de establecer de acuerdo con la medición sigma quién tiene mayor incidencia en la generación de defectos, en tanto que los defectos son producto de situaciones que se encuentran fuera de control por causas conocidas o desconocidas. Cabe recordar que durante la revisión de la documentación existe el registro de fallas por operario y por máquina, pero no se establece de manera específica qué las generó, como se presenta en la Figura 22.

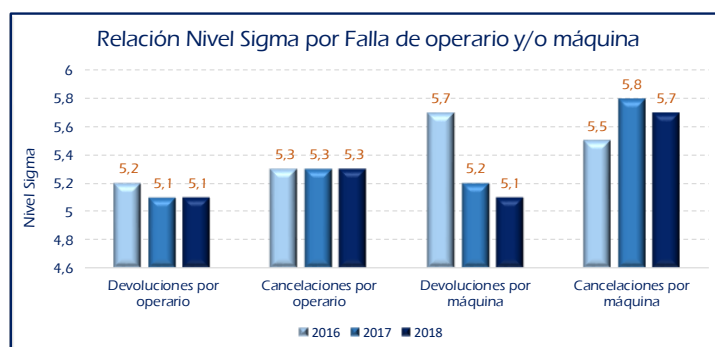


Figura 2233. Relación nivel sigma por fallas de operario y/o máquina

En la figura anterior, se puede observar que las fallas por operario en los últimos dos años tienen bastante incidencia respecto a las fallas que son atribuidas a la máquina, teniendo impacto tanto en la generación de cancelaciones de ciclo y en las devoluciones por inconformidad de los paquetes esterilizados, no obstante no se debe dejar de lado las fallas por máquina, que también han ocasionado devoluciones por inconformidad, a pesar de que tiene menor oportunidad de generación de defectos (3 oportunidades); caso contrario a las cancelaciones de ciclo que pueden generar un total de 16 oportunidades de falla en el proceso, está no presenta aumento de defectos. En la Tabla 13 y la Figura 23 se resume la medición sigma realizada en la fase anterior para el proceso en general.

Tabla 13. Resumen cálculo nivel six sigma general del proceso

Año	DPMO	DPO	YIELD	Nivel sigma
2016	5	0,000005	99,9995%	5,9
2017	65	0,000065	99,9935%	5,3
2018	57	0,000057	99,9943%	5,3

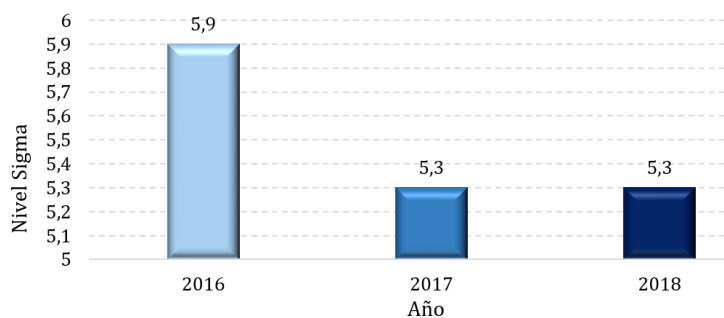


Figura 2334. Nivel Sigma General del Proceso

Los resultados muestran que el proceso de esterilización por autoclave tiene un nivel muy cercano a 6 sigmas, lo que indica que el proceso está cumpliendo en mayor medida con su propósito en cuanto a la entrega de instrumentos de manera óptima a los procesos medico asistenciales para su uso, pues los procedimientos empleados en la central exigen cierta rigurosidad para obtener resultados de acuerdo a como se exigen los estándares de entrega de instrumental (cumplimiento de indicadores físicos, químicos, biológicos); empero, es importante tener en cuenta que en los últimos años el nivel disminuyó, lo que indica que se están presentando defectos durante el proceso, por lo que se deben emprender planes de acción que permitan mitigar progresivamente las causas generadoras de estas fallas, pues con la reducción de la complejidad, variabilidad y los aspectos fuera de control en el proceso, se ha de llegar a la excelencia [14].

Es así, como interiorizar el uso la metodología six sigma permite reducir la variabilidad de los procesos y gestionar de manera más eficiente las actividades, permitiendo desarrollar proyectos que lleven a un mejor nivel a los centros de atención médica [15], en este caso, la medición en la central de esterilización aún no llega a un nivel sigma de 6 por lo que se debe evaluar las acciones de mejora a emprender, para garantizar completamente la calidad del instrumental a usar. También es preciso tener presente, que el enfoque está dado a alcanzar la calidad necesaria para el adecuado uso clínico del instrumental y no para conseguir una central de esterilización industrialmente productiva; aunque ambos formen parte del concepto de calidad total [16].

3.4 Fase Analizar

3.4.1 Identificación de causas

A continuación, se realiza un análisis preliminar usando como herramienta el diagrama de Ishikawa, donde se evidencia, que no se cuenta con la medición y análisis de procesos que establezcan el impacto de las actividades que se desarrollan en la Central de Esterilización. La metodología Lean Healthcare permite mejorar la calidad y minimizar los costes infructuosos, optimizando o rediseñando actividades o procesos clave para eliminar los desperdicios, siendo preciso medirlos pues “disponer de los KPI (Key Performance Indicators) adecuados permite anticiparse a los problemas y que todo el personal de la empresa esté alineado con los objetivos y estrategias de esta. En la Figura 24 se presenta la identificación de causas preliminares con el diagrama de Ishikawa.

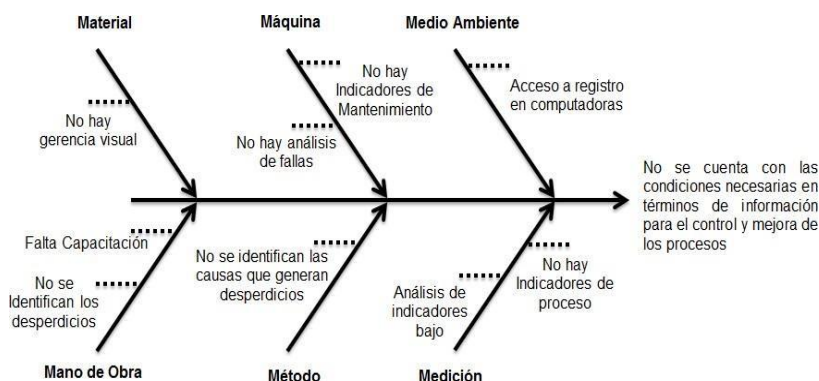


Figura 24. Análisis de Ishikawa: Indicadores

De acuerdo con la figura anterior, las causas que inciden en la gestión del proceso se relacionan con la necesidad del fortalecimiento de la gestión de la calidad en la CE, y sugiere la implementación de un sistema de gestión de conocimiento que permita establecer controles efectivos en el proceso de esterilización y la sistematización de la información que permita generar reportes periódicos y el análisis de información en tiempo real.

4. CONCLUSIONES

El estudio permitió definir cuáles son los requerimientos de los clientes para focalizar esfuerzos en el mejoramiento de las características de calidad del producto final. Se determinó que el proceso más crítico (autoclave) cuenta con un nivel sigma promedio de 5,5 para los tres años de análisis representando que se encuentre en el valor superior del promedio del sector industrial.

El valor sigma ha disminuido teniendo en cuenta que la adquisición de nuevos equipos por modernización y la rotación del personal operativo en la CE. La gestión de la calidad en la CE se ha limitado a la gestión documental para el cumplimiento de las normas internacionales y nacionales de aseguramiento de la calidad, sin embargo, se evidenció la falta de un sistema de gestión de conocimiento que permita gestionar la información y toma de decisiones confiables y rápidas para el proceso.

Las variables analizadas corresponden al proceso de esterilización por vapor de agua (autoclave), siendo el proceso más crítico por la cantidad de unidades procesadas por día. Se determinó que una de las causas más representativas en términos de devoluciones y cancelaciones de ciclos es el manejo por parte del operario.

Las causas deben ser analizadas en la siguiente fase del estudio, permitiendo que se establezca su incidencia a partir del uso estadístico y con ello proponer un plan de acción orientado al mejoramiento del proceso de esterilización.

REFERENCIAS

- [1] Schiffers, H., Zaatreh, S., Mittelmeier, W., Bader, R. "Potential infection control risk associated with roaming healthcare industry representatives". *Journal of Infection Prevention*, vol. 17, no. 1, p. 22-28, 2016.
- [2] Rutala, W. and Weber, D. "Infection control: the role of disinfection and sterilization" *Journal of Hospital Infection* vol. 43, S43-S55, 1999
- [3] Gowen, C., Stock, G., Mcfadder, K. "Simultaneous implementation of Six Sigma and Knowledge Management in Hospitals" *International Journal of Production Research*, vol. 46 no. 23, p. 6781-6795, 2008
- [4] Migita, R., Yoshida, H., Rutman, L., Woodward, G. "Quality improvement methodologies: Principles and Applications in the pediatric emergency department" *Pediatric Clinics of North America*, vol. 65, no. 5, p. 1283-1296, 2018
- [5] Rozo-Rojas, I. et al. Revisión de literatura de prácticas para evaluar la calidad del servicio en instituciones de salud: Hacia un enfoque de Lean Healthcare. En Serna M., E. (Ed.), Desarrollo e Innovación en Ingeniería. Instituto Antioqueño de Investigación, 2018.

- [6] Lind, D., Marchal, W., Wathen, S. Estadística Aplicada a los Negocios y a la Economía. 15a ed. McGrawHill, México, 2012.
- [7] Torres, P. "Applying holonic manufacturing for effective Six Sigma projects" *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, vol. 10, no. 3-4, p. 201-220, 2017
- [8] Chen, K. et al. "Development and application of a performance evaluation matrix: A case study on exploring the items considered critical to quality" *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 48, no. 5, 2020
- [9] Castrillón Cifuentes, J., 2010. Costos Para Gerenciar Servicios de Salud. 3 ed. Ediciones Uninorte, Bogotá.
- [10] Vargas, M. E. & Aldana, L., 2014, Calidad y servicio Conceptos y Herramientas, 3a ed. ECOE Ediciones, Bogotá.
- [11] Arango, L. J. "Importancia de los Costos de la Calidad y No Calidad en las Empresas de salud como Herramienta de Gestión para la Competitividad" *Revista EAN* vol. 67, no. 67, pp. 75-94, 2009
- [12] Barea, J., "El Hospital, empresa de servicios" *Rev. Gestión y Evaluación de Costes Sanitarios*, vol.1, no.2, pp. 93-100, 2000.
- [13] Acosta, S. I. & Stempliuk, V. d. A. "Manual de Esterilización Para Centros de Salud". 1a ed. OPS, Washington, D.C. 2008
- [14] Besterfield, D. H. Control de calidad. 8a ed. Pearson Educación, México, 2009
- [15] Pérez Pulido, M. O., Orlandoni Merli, G., Ramoni Perazzi, J. & Valbuena Vence, M., 2018, "Percepción de la Calidad en la Prestación de Servicios de Salud con un Enfoque Seis Sigma" *Rev. Cubana Salud Pública*, Vol. 44, no. 2, 2018
- [16] Ricós, C, Perich, C., Álvarez, V, Biosca, C, Doménech, V, Jiménez, CV, Minchinela, J, Simón, M, Cava, F, García, JV & Fernández, P. "Aplicación del modelo Seis-Sigma en la mejora de la calidad analítica del laboratorio clínico" *Rev. Revista del Laboratorio Clínico*, vol.2 no.1, pp.2-7. 2009.

Aplicación del ciclo de vida Business Process Management al proceso de poscosecha en una empresa de flores

Claudia Y. Rodríguez R.¹

Angie P. Mondragón A.²

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito – Colombia

El presente trabajo de investigación busca aplicar la metodología del ciclo de vida de *Business Process Management* (BPM), planteado por Dumas, en una empresa colombiana, del sector floricultor, en un proceso crítico denominado poscosecha. Este modelo incluye seis fases que son: identificación, descubrimiento, análisis cuantitativo y cualitativo del proceso, rediseño, implementación y monitoreo y control del proceso, sin embargo, para este estudio solo se desarrollaron las cuatro primeras fases. Para desarrollar el proyecto se hicieron entrevistas estructuradas y semi-estructuradas a los involucrados, además se tomaron tiempos de las actividades, y observación directa del trabajo desarrollado por los operarios, durante 3 meses. Adicionalmente, se realizó una búsqueda sistemática de información en artículos científicos de estudios similares en otros países. Aplicar el modelo fue difícil porque las pymes de flores no tienen un desarrollo tecnológico adecuado para el desarrollo y control de los procesos. Esto obligo a recoger y preparar toda la información manualmente, sin posibilidad de tener históricos sobre los mismos. Los resultados de este estudio, nos indica que el modelo facilita identificar problemas específicos que no son evidentes en la operación del día a día, también el análisis cuantitativo y cualitativo dio luces sobre indicadores que se podrían implementar en el proceso para medir la eficiencia y eficacia, el método también ayudo a identificar problemáticas a nivel de los recursos humanos, que estaban afectando negativamente los procesos de poscosecha, en la fase de rediseño, donde se proponen mejoras, el modelo ayuda de manera consistente, sistemática y completa para asegurar una visión holística del proceso. Esta fase se complementó, ya que no solo se usaron las heurísticas sino también herramientas de mejoramiento de ingeniería. Teóricamente, las recomendaciones de mejora que se plantean son significativas en cuanto a ahorros de costos, disminución del tiempo de ciclo del proceso y mejora del bienestar laboral a los operarios de esta empresa.

1. INTRODUCCIÓN

Business Process Management es visto como un conjunto de métodos, herramientas y tecnologías utilizados para diseñar, representar, analizar y controlar procesos de apoyo y operacionales; un enfoque centrado en los procesos mejora el rendimiento que combina las tecnologías de la información con metodologías de proceso y gobierno [1]. Durante el desarrollo de este trabajo se definen los conceptos necesarios para introducirnos en el contexto BPM y crear un marco general que permitirá entender la aplicabilidad del método en la empresa de flores analizada. La optimización de procesos ha sido en la actualidad uno de los grandes proyectos a los que se ha enfrentado cada una de las empresas que realizan cualquier actividad productiva [3], dadas estas circunstancias se ve una oportunidad de aplicar estas teorías de mejoramiento en empresas colombianas en un sector muy importante para la economía del país como es el floricultor.

La herramienta que se aplica durante el trabajo de investigación es el ciclo de vida del proceso [3], estudiado bajo el enfoque BPM, los resultados de este trabajo en la industria de flores no solo podría traer beneficios a la empresa en la cual se hizo el trabajo, sino también a otras que se encuentran en similares circunstancias, lo cual repercutiría en un aporte importante a nivel del país, ya que la industria de las flores produce 1.400 millones de dólares de ventas al año, lo que genera aproximadamente 90.000 empleos rurales formales directos [4]. A continuación, se detalla la investigación realizada.

2. CONCEPTOS

Business Process Management es un sistema integrado de gestión basado en procesos, que utiliza sistemas de información especializados y cubre todos los procesos operativos y de negocio de la organización para hacerla más productiva y competitiva, asegurando un mejoramiento continuo y un mantenimiento permanente de los procesos acorde con la estrategia de la empresa” [5]. El propósito de BPM es aumentar la eficiencia de los procesos dentro de una organización a través de la mejora continua y la innovación [5], a su vez, “un proceso es cualquier actividad o grupo de actividades mediante las cuales uno o varios insumos son transformados y adquieren un valor agregado, hasta lograr un producto terminado” o un servicio que son útiles para por lo menos un cliente [2], [6].

BPM genera óptimas opciones de mejora, ya que se ha diseñado con una visión holística de la organización, superando las mejoras aisladas de los procesos, en cambio busca soluciones inmejorables centradas en el cliente, y además de integra a los empleados involucrados en los resultados finales [7]. Es así, que para aplicar el BPM, se diseñó un modelo cómo se observa en la Figura 1, denominado Ciclo de vida del proceso [2], que como su nombre lo indica es permanente porque hay una realimentación continua de la situación del proceso. El ciclo de vida de los procesos BPM está compuesto por las siguientes fases: Identificación del proceso, descubrimiento, análisis, re-diseño, implementación, monitoreo y control del proceso, para este estudio, solo se llega a la fase de rediseño por cuanto no se tiene la responsabilidad de implementar las mejoras que se proponen a la misma.

¹ claudia.rodriguez@escuelaing.edu.co

² angie.mondragon@mail.escuelaing.edu.co

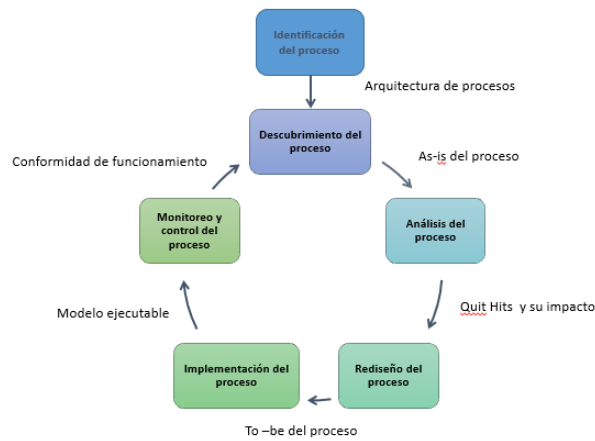


Figura 1. Ciclo de vida BPM

En la fase de identificación se plantea la cadena de valor de la empresa, y se mira con la gerencia cuales son los principales problemas de la empresa y la relación de estos con los procesos críticos, se identifican los procesos y se delimitan, pero además se relacionan entre sí, el resultado de esta fase es la identificación del proceso actualizado, que proporciona una visión general, de la organización y de sus relaciones. En algunos casos la identificación del proceso se realiza en paralelo con el rendimiento del mismo [2], [4]. En la identificación se elige el proceso y la razón por la cual se va a trabajar sobre este, en el descubrimiento se escribe el estado de cada uno de los procesos actualmente en la empresa, en el análisis de proceso se cuantifican y cualifican todos los problemas asociados con el proceso, qué son identificados a lo largo de la investigación y el resultado de esta fase es una colección estructurada de todos los problemas [3].

En el proceso de rediseño se identifican los cambios del proceso que ayudan a solucionar los problemas identificados en la fase anterior para permitir que la empresa cumpla con todos los objetivos de calidad y desempeño, además comparan varias opciones de solución de problemas, qué implican el rediseño del proceso y el análisis del proceso, en donde se utilizan diferentes técnicas [3]. En la implementación de procesos se realizan los cambios necesarios para pasar del proceso actual al proceso que debería ser, está implementación de cambios esta abarcada en dos aspectos que son la gestión del cambio organizacional, qué es el conjunto de actividades necesarias para cambiar la manera de trabajar y la automatización del proceso que es el desarrollo de los sistemas o versiones mejoradas que soportan todos los procesos de mejoramiento [2].

También es importante analizar por qué el ciclo de vida BPM se adapta a la perfección al proyecto y es puesto que esta metodología tiene en cuenta las estimaciones necesarias “sobre el esfuerzo preciso para acometer una actividad y el tiempo que se consume en desarrollar dicha actividad al recordar el posible riesgo que está supeditado a la realización de la actividad en cuestión” [2]. Reconocer el impacto que ha generado BPM genera que se afirme que se está convirtiendo en un componente importante para la gestión de la compañía a partir de la adopción de buenas prácticas desarrolladas en las diferentes áreas. Dichas prácticas también deben adoptar un enfoque más estratégico que beneficiará el desempeño de toda la organización, la cual obtendrá una mejor productividad, reducirá los tiempos de respuesta al cliente y los costos, y generará mayor valor, no solo para la compañía, sino para toda la cadena de suministro [8].

La empresa de flores estudiada se dedica a la actividad agropecuaria específicamente en el sector de floricultura, que consta de dos fases que son el cultivo y producción de diferentes productos como ramos de flores. “La industria agropecuaria de Colombia y especialmente la de floricultura, se ha centrado en generar nuevos lugares de producción y espacio en los diferentes mercados, nacionales e internacionales, actualmente el sector floricultor en Colombia ocupa el segundo lugar de producción mundial, después de Holanda” [9]. “Colombia cuenta con más de 1.600 variedades de flores que llegan a más de 90 países en el mundo, de todas las flores producidas en este país la especie que más utilidades deja es la rosa con 309.4 millones de US\$ seguida por el clavel que genera 225.0 US\$ y luego el crisantemo con 152.8 US\$ datos obtenidos para el año 2017” [3].

Además, es importante completar el método BPM con la manera correcta de diagramarlo, el acrónimo BPMN significa *Business Process Modeling Notation* (Notación para el Modelado de Procesos de Negocio). El BPMN es un estándar que define una notación gráfica para representar un modelo de proceso de negocio, en un formato de flujo de trabajo. Actualmente se encuentra en su versión 2.0 [2]. Para entender cómo se desarrollaron los diagramas más adelante hay que conocer las partes:

1. **Eventos:** La representación gráfica de los eventos es un círculo y representan algo que sucede durante el proceso de negocio. Como es lógico, si sucede algo durante el proceso de negocio, ese algo afectará al proceso de negocio. Por tanto, los eventos afectarán el flujo del proceso de negocio.

2. Actividades: Las actividades describen las tareas que se deberán realizar en un determinado momento. Son representadas por un rectángulo con los bordes redondeados.
3. Conectores: Existen distintos tipos de conectores, los hay simples y los que llevan asociados a él una condición para que el flujo del modelo siga ese camino.
4. Compuertas: Se representan con la figura de un rombo. El interior de este rombo es el que especifica el tipo de compuerta.
5. Contenedores: Como su propio nombre indica, son el espacio en el cual se encuentra el diagrama BPM, en un contenedor o pool pueden existir varios caminos o lanes, que son subprocesos dentro del pool.

3. MÉTODO

Se procedió a realizar fue una búsqueda sistemática de información de los artículos científicos, los cuales guiaron la investigación con una fuerte descripción teórica de los temas necesarios para desarrollar el ciclo de vida de la empresa. Se seleccionaron artículos en función de los criterios de la investigación, para así lograr que aspectos del ciclo de vida del enfoque BPM que beneficien los procesos de la empresa. Además, se consultaron otros artículos de consultorías realizados por otras personas a otras empresas que le pudieran dar un aporte positivo a la investigación y análisis realizado.

Para el desarrollo de la investigación y análisis se obtendrá información de un proceso real de una empresa de la industria colombiana dedicada al cultivo de flores y fabricación de ramos, nombre que se mantendrá oculto ya que el capítulo es netamente académico. Y se desarrollara el ciclo de vida BPM como se muestra a continuación con el fin de cumplir con los objetivos mostrados en la Figura 2. que es elaboración propia, adaptando el ciclo de vida [2], al desarrollo del estudio.

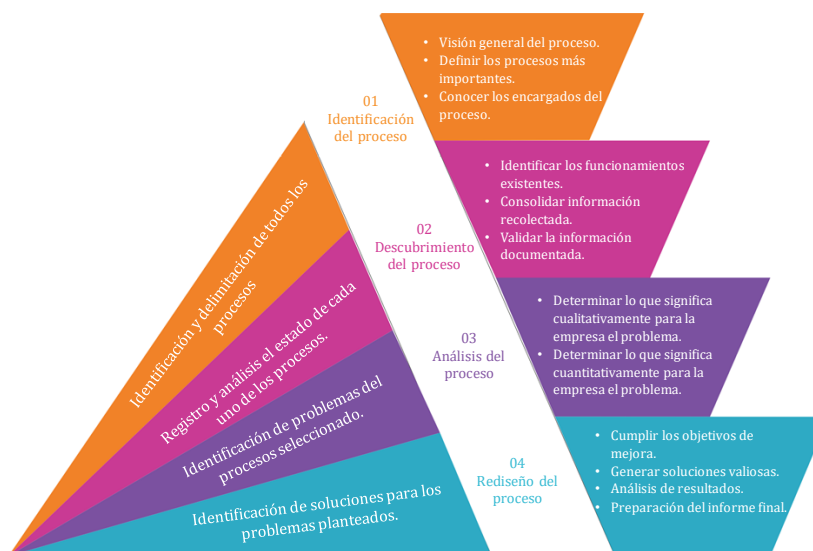


Figura 2. Metodología a desarrollar, ciclo de vida BPM

4. RESULTADOS

4.1 Fase 1: Identificación del proceso

La empresa de rosas es una empresa en la que no se había aplicado BPM antes, durante el estudio de los diferentes procesos de la empresa se evidencio que esta tiene falencias en algunos de sus procesos y esto le está generando pérdidas y demoras en la entrega de productos. La empresa tiene una producción en masa y su proceso de producción está dividido en 3 subprocesos que son: la cosecha, la poscosecha y la venta, cada uno de los procesos deben ser realizados en el orden antes escrito, además el producto que ofrecen es perecedero razón por la cual el movimiento de productos es diario, y cuenta con restricciones como: tiempo en inventario, tiempo correcto de corte, entre otros factores.

El mercado de este producto que son las flores, por su manera de venta se puede considerar un bien estacionario ya que las cantidades vendidas cambian dependiendo del mes del año, como lo es el mes de la celebración de las madres y el mes en el que se celebra san Valentín. Esta empresa cuenta con clientes nacionales variantes dependiendo la demanda y 4 clientes internacionales los cuales generan el mayor porcentaje de utilidades para la empresa, a estos clientes se les entrega un producto en diferentes presentaciones dependiendo la necesidad, las flores son entregadas dependiendo de la especificación de empaque del cliente.

La empresa no abastece todos los productos que necesita para la entrega, para las materias primas cuenta con una finca socia que genera el 30% de su producción y cuenta con proveedores que cambian dependiendo la oferta que estos hacen a la empresa para cada temporada, para algunos productos como lo son las cajas, estuches, pesticidas, productos especiales de limpieza, vitaminas, plásticos de preservación, entre otros.

Sus actores organizacionales están descritos en la Figura 3, los cuales son información obtenida de la entrevista realizada a la gerencia. La empresa cuenta con cuatro procesos estratégicos, pero después de las visitas y de las entrevistas realizadas el proceso que debe recibir atención es poscosecha, ya que es el que genera más pérdidas y los cuellos de botella.

Funciones del negocio	Empresa de rosas
	Área de gerencia
	Área administrativa
	Área de cosecha
	Área post cosecha

Figura 3. Funciones de negocio

4.2 Fase 2. Descubrir el proceso

Se realiza descubrimiento del proceso de poscosecha que consiste en identificar los actores organizacionales, que en este caso son la finca principal y la finca socia, quien le provee de flores cuando requiere y actores funcionales del mismo, que son los cargos de las personas que intervienen en el proceso, para este caso son: el registrador, el patinador, el clasificador, el bonchador, el guillotador, el encauchador, el empacador, el de calidad, el supervisor de cosecha, el supervisor general y la encargada de ventas.

Entre las actividades en general están: recibir las flores del cultivo, poner cajas en tinas, registrar etiquetas, escribir cantidad, separar etiquetas, se analiza si es correcto, avisar supervisor, devolver caja a cultivo, cerrar caja, inmersión flor, seleccionar flor necesaria, recibir la flor, tiene malla, desenmallar, quitar revestimiento, deshojar, despertarla, residuos, seleccionar tipo flor, sirve, poner en nacionales, clasificar flor nacional, sirve, tomar flor nacional, codificar caja, armar los ramos, colocar en banda, cortar ramo, colocar en banda, encauchar ramos, digitar ramos, poner hidratación cuartos fríos, meter ramos en cajas, digitar caja, poner zunchos caja, acomodar carros, la producción es alta, entrar flor a cuartos fríos, organizar flores en cuartos fríos, verificar cajas, todo es correcto, revisar ramo, tomar la flor devuelta, registrar etiquetas, escribir cantidad, separar etiquetas.

Si no es correcto avisar supervisor, devolver caja a cultivo, cerrar caja, inmersión flor, seleccionar flor necesaria, recibir la flor, tiene malla, desenmallar, quitar revestimiento, deshojar, despertarla, residuos, seleccionar tipo flor, sirve, poner en nacionales, clasificar flor nacional, sirve, tomar flor nacional, todo es correcto, revisar ramo, tomar la flor devuelta, notificar a ventas, verificar antigüedad flor, poner banderas, inventariar pedidos, inventariar sobrantes, llenar formatos, sobraron, alistar ordenes, subir en camión, notificar entrega a ventas, enviar correo a cliente, pedido entregado, notificar sobrantes a ventas, vender sobrantes, sobrantes vendidos, entrar flor cuartos fríos, organizar flores en cuartos fríos, poner en árbol, tomar flor árbol, tomar pétalos y hojas soltadas, botar pétalos y flores, botar basura. Los tiempos del modelo se estudian durante 8 días y son tomados para cada una de las actividades del proceso.

4.3 Fase 3. Análisis del proceso

A continuación, se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo del proceso realizado por la empresa de flores (Tabla 2). Es importante aclarar que para el aspecto cuantitativo se evaluaron dos indicadores que son considerados pertinentes para evaluar los problemas de la empresa y son la cantidad de ramos que no se producen y la cantidad de tiempo perdido que genera este problema a la empresa en los casos en los que no se pueda cuantificar por medio de número de ramos.

Para un SKU de 24 flores el tiempo total de producción de poscosecha es de 18.2 minutos con cuellos de botella evidentes en los dos reprocesos, sin estos subprocesos los cuellos de botella serian llenar los formularios de manera manual y hacer inventarios de pedidos y de sobrantes y en procesos los más largos son la clasificación de flores y meter los ramos en las cajas. Se asume que cada ramo tiene un costo de 10.000 pesos aproximados ya que depende del precio del dólar del momento y de la temporada, además se asume que cada trabajador gana el mínimo, ya que esta información no nos fue suministrada por la empresa.

4.4 Fase 4. Rediseño

Para cada uno de los problemas se plantean soluciones que generaran mejoras en la empresa (Figura 5). Una corta ampliación del desarrollo de los temas más complicados está expuesta en la siguiente Figuras 6 y 7.

Tabla 2. Análisis cualitativo y cuantitativo

	Explicación	Impacto cualitativo	Impacto cuantitativo
Calidad	El sistema de calificación de calidad que debe tener cualquier proceso no está creado, ni formalizado en la empresa.	1. Clientes insatisfechos al recibir productos en mal estado. 2. Aumento y reincidencia en de errores de los trabajadores.	1. En el sistema de producción hay aproximadamente 20 personas y cada una devuelve por lo menos un ramo por día, lo que equivale a 20 ramos diarios, es decir pérdidas de \$ 200.000 pesos colombianos diarios.
Despacho de pedidos	Las ordenes no se entregan en orden de pedido, las ordenes en su mayoría están incompletas cuando ya es tiempo de enviar el pedido, debido al poco control de entradas y salidas a los cuartos fríos.	1. Climas laborales hostiles 2. Estrés en el personal, al tratar de completar los pedidos. 3. Pedidos enviados con demoras lo que genera puestas de multas por los clientes. 4. Ventas presenta inexactitud debido a poco control en despachos	1. Multas de los clientes por incumpliendo de los clientes (equivale a \$100.00) pesos colombianos diarios. 2. Ramos perdidos debido al tiempo ocupado por clasificadoras y bonchadoras para cambiar el color o la forma de los ramos y completar los pedidos, lo que equivale a \$400.000 pesos colombianos diarios 3. No hay datos exactos, pero aproximadamente el 50% de los ramos nacionales están ahí por antigüedad y estos se venden a un precio inferior
Inventarios durante el proceso	El inventario durante el proceso no es el mismo al principio que al final, se pierde bastante inventario en cada fase del proceso	1. Se producen confusiones y estrés en los trabajadores 2. Confusión de directivos, que produce intolerancia con los coordinadores. 3. Desorden en la planta de producción. 4. contaminación auditiva por los gritos, ya que se trata de explicar por qué no están las flores.	1. Perdida de utilidades para la empresa (de lo cual tampoco se tiene control) por flores rotas o desaparecidas en el proceso. 2. equivale al 20% de las flores que entran en el proceso, y no se puede cuantificar, pero equivale al 20% de las pérdidas de las utilidades
Personal	1. No se cumplen promesas en cuanto: vacaciones, remuneraciones por horas extras, premios o incentivos. 2. El trato de las mujeres y los hombres no es igual. 3. Solo los superiores conocen cuales son las actividades para realizar en el día y son solamente ellos responsables.	1. Trabajadores desmotivados 2. Aumento de enfermedades laborales 3. Rotación alta de personal en poscosecha 4. Aumento de la discriminación, poca equidad de esfuerzo entre los cargos, 5. Baja aceptación de los hombres y abuso de ellos. 6. Falta de profesionalismo en el trato de empleados por cargos superiores. 7. Alta rotación de personal	Personas que se ausentan más de 3 veces al mes por motivos personales o médicos son 10 ramos que no se hacen al día lo que equivale a \$100.000 pesos colombianos diarios.
Instalaciones	1. Espacio reducido de los cuartos frío. 2. Espacios de trabajo no ergonómicos. 3. Desorden en la planta. 4. Carros y vías de transporte de productos sin mantenimiento.	1. Las carreteras y carros dañados producen estrés, cansancio y además sobreesfuerzo en los trabajadores lo que produce enfermedades laborales. 2. Las mesas de trabajo, las tinas, las máquinas de cortar y las repisas no están a alturas adecuadas lo que genera enfermedades laborales.	Se invierten 2 h de 2 o 3 personas diarias, buscando y acomodando cajas para encontrar lo que necesitan. 50% más largos los tiempos de desplazamiento por obstáculos en las vías de desplazamiento durante el proceso.

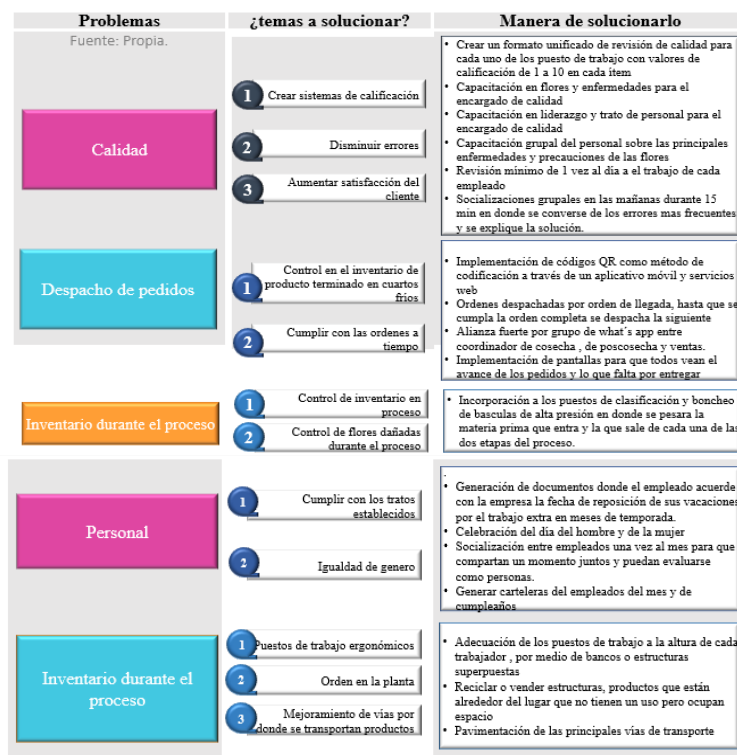


Figura 5. Soluciones parte 1

Despacho de pedidos

- Para la sección de inventarios en cuartos fríos se consultó y analizo todas las posibles soluciones en cuanto a logística, en donde se llegó al siguiente análisis, se deben tener en cuenta 3 pilares:
- 1. Tipo de inventario (clase de flor)
- 2. Tiempo de estadía en cuartos fríos
- 3. Capacidad de los cuartos fríos
- Para esto se recomienda realizar una implementación de códigos QR como método de codificación, para sistema de inventario a través de un aplicativo móvil y servicios web[15], esto quiere decir que ahora para cada uno de los ramos habrá un código QR que es código bidimensional, fácilmente identificable por los tres cuadros ubicados en las esquinas superiores e inferior izquierda. Puede contener información de caracteres alfanuméricos, símbolos, Kanji, Hiragana, Katakana, códigos binarios y códigos de control[16] en donde para esta caso, están las cantidades, clases de flor, es decir el color y el tipo y fecha de llegada a cuartos fríos en cada una de las cajas, luego a través de un aplicativo móvil que es una aplicación informática diseñada para ser ejecutada en teléfonos inteligentes, tabletas y otros dispositivos móviles, son estas aplicaciones las que permiten que los usuarios ejecuten un conjunto de tareas de cualquier tipo[17], es decir las personas al entrar a las cajas deben desde su celular que previamente tiene descargado el aplicativo de registrar códigos QR que es gratis para los sistemas Android, registrara la entrada y salida de los ramos, lo que simultáneamente se subirá a un sistema de información que la empresa deberá comprar; en donde se almacenara toda la información de todas las personas que ingresen o saquen cualquier ramo de los cuartos fríos, el sistema de información que estará en la web, estará disponible para poscosecha pero también para compras en tiempo real, para que estos departamentos sepan que hay en inventario y no sobreventa y también para que vean como se están cumpliendo las órdenes, en cuanto al problema de la línea y de no saber cuándo se completaron las ordenes se debe implementar un sistema de pantalla que esté conectado al sistema de servicios web y muestre las ordenes que faltan es decir cuántos ramos de cada tipo de flor, que debe decir para que tipo de cliente y los próximos pedidos a despacharse, esta pantalla debe poder visualizarse por todos los puestos de trabajo

Figura 6. Profundización en despacho de pedidos

Inventarios

- Este fue el problema que más dificultades tenía, ya que se sesga por el tipo de producto que es, y además por el poco volumen y peso que por unidad tienen las materias primas y el producto, el volumen ocupado por una flor no es algo que pueda notarse de manera evidente, una solución que se puede adaptar bien a este problema, es la incorporación en cada puesto de trabajo de básculas de precisión como puede ser una báscula XPE303SN esta báscula permitirá mostrar 3 cifras sin corta aires es decir valores con el peso mínimo más bajo, hasta ahora la más avanzada del mercado, además de por su avanzada tecnología tienen un manejo sencillo que permitirá el correcto uso por cada uno de los empleados[18], esto funcionara así: se instalan las básculas en los puestos de trabajo(es decir se instalaran en los puestos de las clasificadoras y bonchadoras) y el trabajador pesara sus flores al inicio y al final de cada uno de sus procesos, llevando un registro escrito de cada uno de los datos obtenidos, lo que le servirá al trabajador para autoevaluarse y ver que fallas tienen y por qué están perdiendo tanta flor en el proceso pero también le servirá a los directivos para determinar en qué partes del proceso se está perdiendo más flor y así generar mejoras en los puesto de trabajo o en la capacitaciones a trabajadores, entre otras.
- este método ya fue implementado en otras industrias como lo son la de la joyería e industrias de tecnología debido al uso piezas pequeñas diseñadas para sus productos, uno de los ejemplos más famosos es Linde Material Handling Schweiz AG, quienes implementaron una solución de recuento de piezas de METTLER TOLEDO en donde se hizo 5 veces más rápido verificar los inventarios en proceso[19]

Figura 7. Profundización en inventarios

Además, para terminar de solucionar de forma general el proceso se usan 2 heurísticas respecto a la mejora del proceso, que se presentan en las Figuras 8.

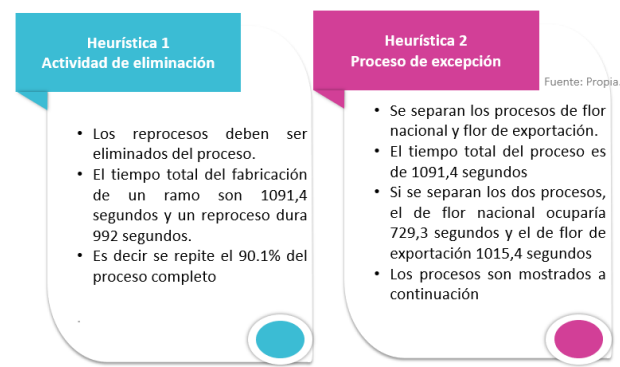


Figura 8. Soluciones parte 2

5. CONCLUSIONES

A partir del estudio del ciclo de vida bajo el enfoque BPM, se analiza exitosamente la empresa de flores colombiana, se logra desarrollar cada una de las etapas del ciclo vida, lo cual garantiza a la empresa, que muchos de sus problemas luego de la implementación de las soluciones van a mejorar generando mayores utilidades a la empresa.

La eliminación de actividades que no le daban valor agregado a la empresa, y la separación de los procesos que, aunque sean parecido tienen diferente fin, además del establecimiento de sistemas de calidad, implementación de códigos QR como método de codificación, para sistema de inventario a través de un aplicativo móvil y servicios web, la implementación de básculas y de remuneraciones salariales y no salariales en la empresa generaran el aumento de la productividad y con esto se garantizaría la optimización el proceso.

Se debe implementar un Sistema de Gestión de Calidad, lo que genera unos nuevos objetivos que serán: Calidad de diseño, calidad de conformidad, calidad de uso y el cliente es el nuevo objetivo [10], [11].

Aunque grandes compañías están demandando personal capacitado para la gestión de BPM como IBM, Accenture, Oracle, Microsoft y un larguísimo entre otras, desarrollar esta tecnología en empresas medianas como es la empresa de flores puede vislumbrar un futuro halagüeño para BPM y aprender a utilizar esta herramienta se vuelve vital, ya que parece que será el futuro de los mejoramientos de las empresas.

Además se logró demostrar que las tecnologías de la información y su debida apropiación generan valor y ventaja competitiva a las empresas ya que les permite ejecutar sus actividades de valor de manera óptima, soluciones como BPM en compañía de las buenas prácticas propuestas conviertan la gestión de procesos de negocio en una técnica estratégica, que “permite generar y controlar “Cambios” de forma ágil, oportuna, confiable y de calidad, con miras al logro de los objetivos establecidos por dichas empresas” [15].

Es importante, además escuchar a las personas y sus iniciativas, darles el poder de aportar su experiencia y conocimiento al mejoramiento de los procesos y, por último, romper con la rigidez burocrática y entender que, en ciertos momentos, escuchar a todas las partes de la empresa es importante y en eso deben ser más flexibles las empresas, siempre se esté actuando dentro de un marco normativo y regulatorio del lugar.

Para próximos estudios que sigan en esta línea, se podría aplicar este modelo en una organización donde se pueda medir y analizar una empresa que cuente con más información, para hacer un mejor estudio, también se puede luego comparar los resultados, con otras empresas y comparar acorde con los resultados del estudio.

A la empresa se le recomienda la sistematización de los procesos ya que para que la parte de inventarios y ordenes se hace complicado hacer todo de manera manual y para próximas intervenciones en esta empresa será importante conocer mucha más información que deberán recolectar.

Se recomienda hacer un estudio de mercado, para con ello generar una salida de negocio con los desperdicios producidos por la producción como son los pétalos de las flores que en la actualidad son usados para productos estéticos, se ha extendido a la preparación del conocido coctel “Gin Tonic” al que le otorga una coloración rojiza. También se utiliza para mermeladas, confituras, “agua de rosas”, postres, helados, dulces e infusiones.

Se recomienda recolectar información en cada una de las partes de los procesos sobre la pérdida de productos por diferentes razones que no se conocen, con esta información se podrían obtener soluciones más amplias y obtener mejores resultados

REFERENCIAS

- [1] D. Blanca and C. Mora, “Plan de mejoramiento para la gestión de procesos de negocio en la unidad de planificación rural agropecuaria (UPRA), empleando la metodología de gestión de procesos de negocio–BPM,” Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2018. [Online], Disponible: <http://www.thewest.com.au>. [Accedido Junio 18, 2018].
- [2] M. Dumas, M. La Rosa, M. Jan, and R. A. Hajo, *Fundamentals of Business Process Management*. 2013.
- [3] Ministerio de Agricultura, “Cadena de flores y follajes,” Bogotá D.C., 2018. [Online], Disponible:<https://www.coursehero.com/file/42015585/002-Cifras-Sectoriales-2018-Marzo-Florespdf/>. [Accedido Sept 6, 2018].
- [4] C. Y. Rodríguez, “Qué es Business Process Management BPM. Definiciones y conceptos,” *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, vol. 25, no. 98, pp. 23–29, 2015. [Online serial]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/314101230_Que_es_Business_Process_Management_BPM_Definiciones_y_conceptos_httpwwwescuelaingedu_corevistahtm/. [Accedido Junio 2, 2018].
- [5] R. Carro and D. González, “El sistema de producción y operaciones,” *Facultad de Ciencias Económicas y Sociales*, vol. 1, pp. 1–26, 2003. [Online], Disponible: <http://nulan.mdp.edu.ar/1606/>. [Accedido Julio 7, 2018].
- [6] T. Schmiedel, J. Brocke, and J. Recker, “Is your Organizational Culture Fit for Business Process Management?” *BPTrends*, vol. 19, No. May, pp. 1–5, 2012. [Online], Disponible: <https://pdfs.semanticscholar.org/44c0/07ab99683a2b4c3b043bb50c01c2b6be27bd.pdf>. [Accedido Mayo 11, 2019].
- [7] P. Fuentes, “Aplicación de la metodología BPM en la trazabilidad de los productos hortofrutícolas,” *Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)*, 2012. [Online], Disponible: <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/4fc7f67f80659.pdf> [Accedido Abril 26, 2019].
- [8] A. Sánchez, C. Y. Rodríguez, and A. F. Santos, “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*, No. Edición especial, pp. 85–108, 2018. [Online], Disponible: <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revista/article/view/2019> [Accedido Junio 14, 2018].
- [9] M. L. Quirós, “La floricultura en Colombia en el marco de la globalización: aproximaciones hacia un análisis micro y macroeconómico,” *Revista Universitaria EAFIT*, vol. 3, no. 1, pp. 59–68, 2001.
- [10] J. Costas and J. C. Puche, “Entender el ciclo PDCA de mejora continua,” *Revista Calidad*, pp. 55–58, 2010. [Online], Disponible: https://www.aec.es/c/document_library/get_file%3Fp_l_id%3D64199%26folderId%3D195586%26name%3DDLFE-7137.pdf [Accedido Mayo 10, 2019].

- [11] M. A. Barrios, "Círculo de Deming En el Departamento de Producción de las Empresas Fabricantes de Chocolate Artesanal de la ciudad de Quetzaltenango," p. 115, 2014. [Online], Disponible: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesiseortiz/2015/01/01/Barrios-Maria.pdf> [Accedido Febrero 2, 2019].
- [12] K. Vargas and D. León, "Implementación de código QR como método de codificación, para sistema de inventario a través de un aplicativo móvil y servicios web. Implementación de Código QR como Método de Codificación, para Sistema de Inventario a través de un Aplicativo Móvil y Servi," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017. [Online], Disponible: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5967/1/VargasGuzm%C3%A1nKevinAnderson2017.pdf> [Accedido Marzo 16, 2019].
- [13] A. Mettler-Toledo, "Weighing & Dosing Reliable Results for Years to Come Follow the Green Light," Switzerland, 2015. [Online], Disponible: https://www.mt.com/dam/P5/labtec/Product_Brochures/XPE/30208820_BR_en_XPE_Weighing_Solutions_LR_07_2015.pdf [Accedido Junio 16, 2019].
- [14] J. Garrido, "TFC Desarrollo de aplicaciones móviles," Universidad Oberta de Cataluña, 2013. [Online], Disponible: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/18528/6/jugarridocoTFC0113memoria.pdf> [Accedido Enero 19, 2019].
- [15] C. Franco, "Propuesta de rediseño de procesos de negocio de la compañía de tecnologías de la información y la comunicación telefónica Colombia - Movistar: proceso de gestión de cambios tecnológicos," Universidad Católica de Colombia, 2015. [Online], Disponible: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream> [Accedido Mayo 9, 2019].

Recubrimiento tipo carburo de Tantalio y carburos de Hafnio con capa intermedia de oro para elevar la resistencia a procesos corrosivos

Willian Aperador C.¹

Pablo A. Guillermo G.²

Jorge H. Bautista R.³

¹ Universidad Militar Nueva Granada – Colombia

² Griffith University – Australia

³ Universidad Francisco de Paula Santander – Colombia

Se depositaron recubrimientos de Carburo de Tantalio (TaC), Carburo de Hafnio (HfC) y mezclas de TaC- HfC, con y sin capa intermedia de oro sobre sustratos de acero 316LVM vía deposición física en fase vapor (PVD). Con el fin de estudiar el efecto de la capa intermedia de Oro, en su respuesta frente a la corrosión por picadura. El deterioro electroquímico fue hallado mediante curvas de polarización, los recubrimientos estuvieron en contacto con una solución de Hank a temperatura (37°C) y pH 7,9. Las superficies fueron caracterizadas luego del ensayo electroquímico, mediante Difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Se encontró que la capa intermedia de Oro mejora las propiedades electroquímicas ya que no se presenta la corrosión por picado, adicionalmente disminuye la velocidad de deterioro.

1. INTRODUCCIÓN

El cuerpo humano se encuentra en constante evolución, la cual se manifiesta en una expresión fenotípica por medio de las condiciones ambientales [1]. Este sistema biológico se caracteriza por responder a estímulos y llegar a un estado de homeostasis, la cual hace referencia a mantener todos los órganos y tejidos en equilibrio con el funcionamiento del sistema, lo que conlleva a que el ambiente interno del cuerpo tenga una variación muy pequeña dentro de un rango muy estrecho de variables como: temperatura, presión, pH, concentración de iones etc.; las cuales son modificadas para mantener el sistema en este rango [2]; así mismo identifica los agentes externos los cuales son reconocidos por medio de los mecanismos de defensa que le permiten atacar componentes extraños para salvar guardar el equilibrio interno del sistema. Es por esto que no cualquier material puede ser implantando en el cuerpo humano, debido a que, si no cumple características como biocompatibilidad, buena resistencia a la corrosión o resistencia al desgaste mecánico, se puede llegar alterar las variables anteriormente mencionadas, ocasionando dese un daño celular hasta un daño parcial en órganos y el entorno del sistema [3].

Con el paso del tiempo se han desarrollado nuevos materiales que puedan ser implementados en el área de los biomateriales, concretamente en el área ortopédica enfocando los avances en no afectar el funcionamiento del cuerpo humano [4]. El Titanio y sus distintas aleaciones han presentado un marco de referencias para la fabricación de prótesis, debido a características como buena resistencia a la corrosión, una respuesta favorable en términos de biocompatibilidad y buenas prestaciones de servicio mecánico permiten el uso de este elemento en gran variedad de aplicaciones. Sin embargo, debido a una creciente demanda y la baja producción de este metal se ve la necesidad de generar nuevos estudios sobre diferentes materiales para suplir la demanda en el mercado [5].

Un elemento que ha presentado gran acogida como biomaterial es el Tantalio puesto que permiten mejorar la resistencia a la corrosión de gran variedad de materiales además de presentar una superficie inerte y rugosa, que facilita el crecimiento celular mejorando la respuesta de biocompatibilidad [6]. Al agregar Carbón y Hafnio se puede obtener un recubrimiento que puede llegar a ser muy denso y tenaz. El acero 316L es un material muy implementado en la instrumentación quirúrgica debido a su costo, sin embargo como implante permanente ha sido rechazado ya que presenta la liberación de los iones al ser expuesto a las condiciones presentadas en el interior del cuerpo humano, este aumento por lo que este aumento se podría justificar por la falta de homogeneidad de la capa de óxido así como por la presencia de poros en la superficie, que contribuyen a acelerar el proceso de degradación química y, por tanto, a alcanzar una mayor velocidad de liberación de iones níquel, presentes en la capa de transición, e iones cromo, en la capa pasiva.

2. MÉTODO

2.1 Diseño Experimental

Las bicapas de Au/TaHfC fueron depositadas sobre sustratos de silicio (100) y acero AISI D3 mediante la técnica de magnetron sputtering no-reactivo usando un sistema AJA-ATC 1800 con una presión base de 10^{-7} Pa. Para el depósito de las películas delgadas se usaron targets individuales de 2 pulgadas de diámetro con una pureza de 99.999% para el carbono (C) y 99.95% para los blancos de oro (Au), Tántalo (Ta) y hafnio (Hf), en una configuración confocal a una presión de 0.4 Pa de argón puro. Las películas de oro de aproximadamente 100 nm de espesor fueron primero

¹ william.aperador@unimilitar.edu.co

² pabloaguzman88@gmail.com

³ jorgeh.bautista@gmail.com

depositadas a temperatura ambiente y con una rotación de los sustratos de 80 rpm durante 4 minutos y a una potencia d.c. en el target de oro de 150 W. Previo al depósito de las películas, los sustratos fueron limpiados con etanol y posteriormente con un plasma de limpieza a una potencia r.f. de 25 W (190 V) en una presión de 4 Pa de argón durante 10 min. Para mejorar la adhesión de las películas de oro, una capa metálica de Ta-Hf de alrededor de 20 nm de espesor se depositó aplicando una potencia r.f. de 100 W a cada blanco de Ta y Hf.

Finalmente, las películas de Ta-Hf-C con diferentes composiciones y espesores alrededor de 600 nm se depositaron variando la potencia r.f. a los blancos de Ta y Hf (100 W – 0 W, 70 W – 30 W, 30 W – 70 W y 0 W – 100 W, a las que llamamos TaC, 70TaC-30HfC, 30TaC-70HfC y HfC, respectivamente, y manteniendo la potencia d.c. al blanco de carbono fija en 380 W. Las películas de Ta-Hf-C se depositaron a una temperatura de los sustratos de 300 °C y a un voltaje de polarización negativo r.f. de 50 V y una distancia blanco-sustrato de 15 cm durante aprox. 2 horas.

2.2 Caracterización de los recubrimientos

- *Difracción de rayos X.* Los ensayos en la configuración de Bragg Bretano tradicional fueron desarrollados en un difractómetro Empyrean de Panalytical con un radio de haz incidencite de 240mm, la línea del tubo de cobre presenta un $K\alpha_1$ de 1.540598Å y un $K\alpha_2$ de 1.544426Å. La diferencia de potencial implementado fue de 45 kV con una intensidad de 40mA, el rango de barrido fue de 20° a 90°. El tamaño de paso designado para este ensayo fue de 0.0400° con un tiempo de conteo de 2 segundos para un total de 2125 puntos. En el haz incidente se implementa un filtro de níquel para atenuar la $K\beta$, una rejilla de divergencia de 1°, una rejilla de anti-dispersión de 2° y una rejilla soler de 0.04rad. En el haz difractado se tiene una rejilla receptora de 1/4°, una rejilla anti-dispersora de 1/2° y una rejilla soler de 0.04rad. La interpretación de los resultados fue desarrollada en el software de HighScore con las bases de datos de la ICSD de panalytical y la COD versión libre.
- *Microscopia Electrónica de Barrido.* Para la caracterización de la microestructura, se utilizó un microscopio electrónico de barrido NeoScope JMC-5000, que tiene hasta 40.000 aumentos con la finalidad de caracterizar la superficie y estudiar como los procesos antes y después de someterlos a degradación por corrosión generan un cambio morfológico en las diferentes muestras.
- *Espectroscopia de impedancias electroquímica.* La técnica de impedancia electroquímica (EIS), es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) y determinando la respuesta correspondiente. En el procedimiento experimental más comúnmente usado, se aplica una pequeña señal de potencial a un electrodo y se mide su respuesta en corriente a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial, tiempo y corriente, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina espectro de impedancias. Las medidas de impedancia fueron hechas usando un analizador de frecuencias. Los diagramas se obtuvieron realizando barridos de frecuencia en el rango de 100 kHz hasta 0.001 Hz, con una densidad de datos de 5 puntos por década. El potencial aplicado alternante presenta un comportamiento sinusoidal cuya amplitud fue de 10 mV sobre el Ecorr. Después de cada experimento los datos de impedancia fueron graficados como diagramas de Nyquist (impedancia real (Z') vs. Impedancia imaginaria (Z'')). De estos gráficos con una alta frecuencia se obtienen los valores de resistencia a la polarización del sistema. La caracterización electroquímica la cual permite analizar los fenómenos de corrosión, se realizó en un equipo Gamry modelo PCI 4; usando una celda electroquímica con tres electrodos, un contra electrodo de platino y un electrodo de referencia Ag/AgCl/KCl(saturated). Todas las pruebas electroquímicas fueron realizadas en una solución salina fisiológica y a temperatura corporal de 38°C, se evaluó previamente durante 60 minutos de esta forma establecer el potencial de circuito abierto (EPCA) o el estado de potencial estable. Para observar la evolución en el proceso corrosivo de las diferentes muestras se utilizó nuevamente el microscopio electrónico de barrido.

3. RESULTADOS

3.1 Difracción de rayos X

En la interpretación de las fases cristalinas de los recubrimientos, se realizó la medición del sustrato sin recubrimiento para identificar los picos característicos que este presenta y con esto identificarlos en posteriores análisis. En la Figura 1 el difractograma obtenido para el acero 316L, se presentaron picos en 43,47°, 50,52° y 74,47° atribuidos a el Hierro y Cromo elementos del acero. En la Figura 2, se observa el difractograma obtenido para la muestra recubierta solo con la película delgada de Au, en este se observa los picos característicos encontrados y como el Au presenta una alta orientación preferencial en el plano (111) a un ángulo de 38.02° el cual está relacionado a la mayor reflexión, el siguiente pico identificado está en 81.86° con una orientación en (222). Este sistema presentó una alta orientación preferencial que se ve reflejada en el número de cuentas obtenidos en el difractograma debido a que generalmente los metales presentan una orientación bien definida y para este caso se presentó una estructura Cubica.

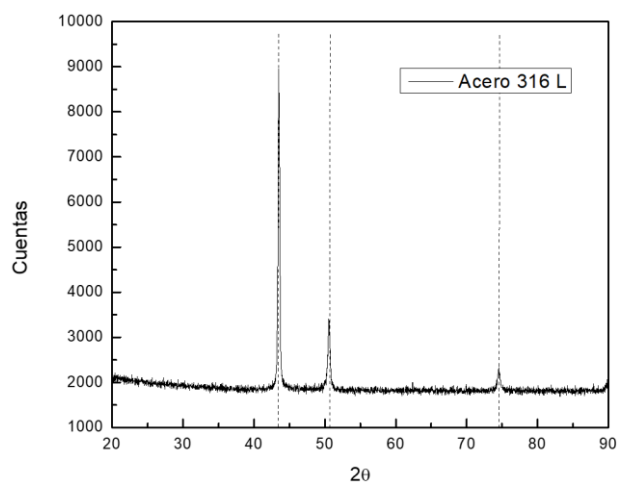


Figura 1. Sustrato de acero 316L

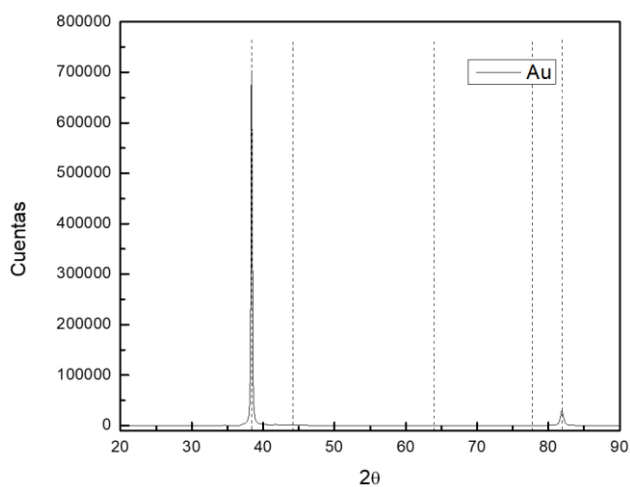


Figura 2. Recubrimiento de Au

En la Figura 3, se observa el difractograma obtenido para la muestra de TaC+Au, este recubrimiento puede presentar las siguientes fases γ - TaC, α -Ta₂C o ζ -Ta₄C₃ [2]. En el software de HighScore se realizó la búsqueda de las fases que presentan concordancia con el ángulo obtenido en el difractograma. Para la fase de α -Ta₂C se obtuvo concordancia en los picos de 33.29°, 36,34°. 38,07°, 50,10°, 59,49°, 69.47°, 71,34° y 76,91° con una estructura cristalina Hexagonal (101) en su mayor reflexión. En la fase ζ -Ta₄C₃ los picos fueron en 35.10°, 40.75°, 50.49°, 59.00° y 70.54° con un sistema cristalino Cubico (111) en su mayor reflexión. Un análisis del pico que se presentó de 36.5° a 40° se observa un pico con un ancho de altura media demasiado extenso para solo ser un pico, a partir de esto se podría concluir que en esta zona se presenta una sobreposición de los picos de la fase α -Ta₂C y el Au puesto que los dos presentan la mayor reflexión en un ángulo de 38.01° y por tal motivo el pico detectado tiende a ser más ancho en su base.

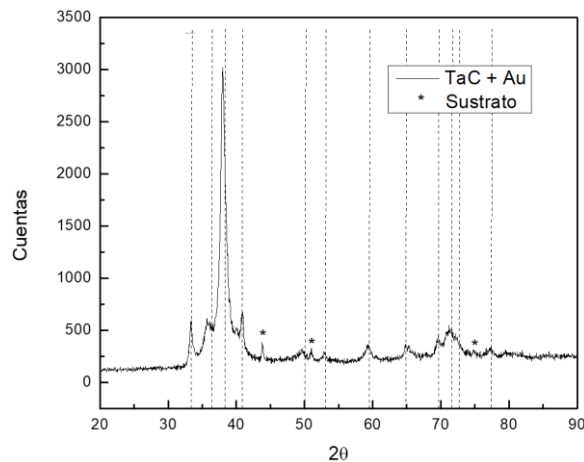


Figura 3. Recubrimiento de TaC+Au

En la Figura 4, se presenta el difractograma obtenido para la muestra de HfC+Au, por medio del software de HighScore se identificó los compuestos que presentan concordancia con el difractograma obtenido, en la cual se evidencio la

presencia de HfC con una concordancia en 33.571° , 38.95° y 70.56° y una estructura Cubica con un plano cristalino (111), para Hf₂Au se presentó concordancia en 36.19° , 69.37° con una estructura Tetragonal y un plano cristalino (103), finalmente para Hf existe concordancia en 34.97° , 40.60° y en 70.25° con una estructura cubica y una orientación en (111).

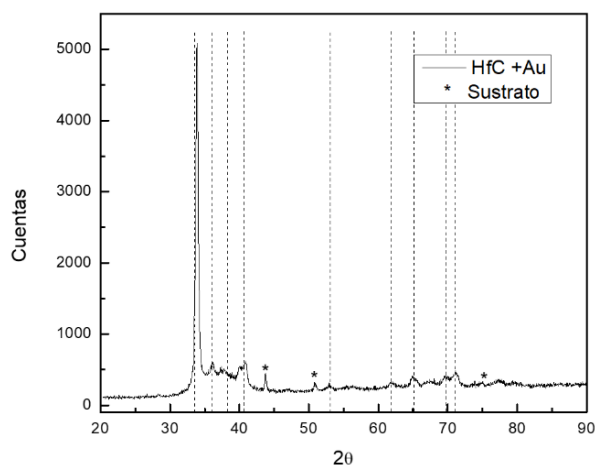


Figura 4. Recubrimiento de HfC+Au

En la Figura 5, se presenta el difractograma obtenido para las muestras de 30TaC 70HfC, en la cual se identificaron compuestos como Ta_{0.5}Au_{0.5} con una concordancia en 37.604° , 39.70° y 69.27° con una estructura Tetragonal y un plano cristalino (020), Hf₁ con concordancia en 36.26° , 65.24° y en 76.99° con una estructura Cubica y un plano cristalino en (011). Los C₂Hf₁Ta₁ presento concordancia en 34.15° , 39.64° , 57.31° y 68.43° con una estructura cubica y un plano cristalino en (111). También se evidencio la presencia de C_{2.667}Ta₄ con una concordancia en 33.65° , 35.82° , 36.40° , 39.34° , 41.97° , 69.55° , 69.79° , 71.10° , 71.47° , 71.89° con una estructura Hexagonal y un plano cristalino en (020). Finalmente se encontró otro compuesto de Hf₁ con concordancia en 36.57° , 56.97° con una estructura Hexagonal y plano cristalino en (101).

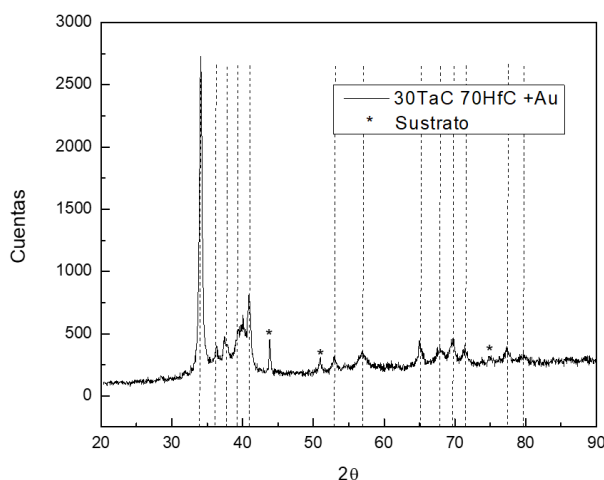


Figura 5. Recubrimiento de 30TaC 70HfC + Au

En la Figura 6, se presenta el difractograma obtenido para la muestra de 70TaC 30HfC+Au, en esta los compuestos que se identificaron fueron Ta₄C_{3.04} el cual presento una concordancia en los ángulos 35.10° , 40.75° , 70.54° y 74.19° presentando una estructura Cubica con plano cristalino (111). El Hf₁ se encontró en 36.26° , 52.23° y 76.99° con una estructura Cubica y un plano cristalino en (110), también se evidencio la presencia de Au_{0.5}Ta_{0.5} con reflexiones en 37.60° , 39.70° , 69.27° y en 73.42° con una estructura Tetragonal y un plano cristalino en (101). Finalmente se presentó un compuesto de Hf₁C₁ con reflexiones en 33.17° , 38.49° y 69.62° presentando una estructura Cubica y un plano cristalino en (111).

En algunos puntos de los difractogramas como por ejemplo el TaC, o el HfC se evidenció del difractograma se evidencia un corrimiento de los picos obtenidos con respecto a los patrones de las bases de datos, es posible concluir que debido a micro deformaciones de compresión o tensión generada en la película delgada a causa del proceso del magnetron sputtering, se producen corrimientos ocasionados por la deformación de los cristales. Aunque se presenten corrimientos, por medio de las reflexiones más altas presentadas por los patrones de difracción en las bases de datos de la ICSD y COD es posible correlacionarlos con el difractograma a partir de identificaciones puntuales en cada uno de los ángulos en 2θ [7].

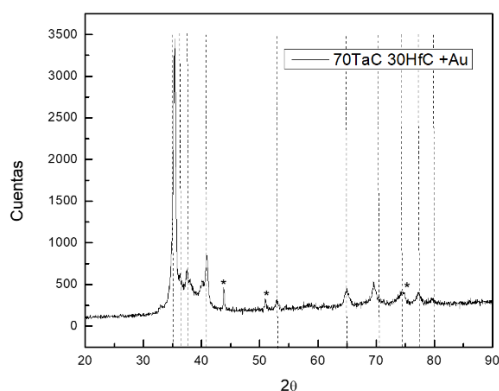


Figura 6. Recubrimiento de 70TaC 30HfC + Au

Las modificaciones superficiales realizadas al sustrato para obtener las condiciones ideales en la deposición de películas delgadas pueden generar cambios en la composición superficial del material y estas deben ser tenidas en cuenta para análisis posteriores. Los recubrimientos de carburo de Tántalo y de Hafnio, fueron obtenidas con capas intermedias de oro, lo cual se obtiene de forma compacta y adherente, el espesor de esta película es de $1\mu\text{m}$, esta capa interna de oro tiene una estructura cubica con una orientación preferencial en el plano (111) como se determinó mediante DRX[1]. Y por encima de esta capa interna, hay una capa formada por un TaC, HfC o TaC-HfC. Los recubrimientos de carburo de Tántalo y de Hafnio, fueron obtenidas con capas intermedias de oro, lo cual se obtiene de forma compacta, el oro es un metal noble, que no es atacado por soluciones salinas, debido a su estabilidad química y la condición de estar libre de poros, lo que lo hace muy útil como protector frente a fenómenos de corrosión.

3.2 Corrosión

En la Figura 7 a, b, c, d y e, se muestran las interpretaciones frente al desempeño de corrosión realizada mediante la polarización potenciodinámica, los desempeños sobre el acero son determinado en términos de las propiedades químicas de estas dos capas de carburo (TaC y HfC) y el oro. Por tanto, los procesos de corrosión se establecieron en función de la estabilidad de estas capas de carburos, generando la protección, siendo únicamente posibles fenómenos de corrosión localizada (picaduras) para los sistemas que carecen de la capa intermedia de Oro, las probetas con capa intermedia presentan una capa protectora que se disuelve por corrosión uniforme.

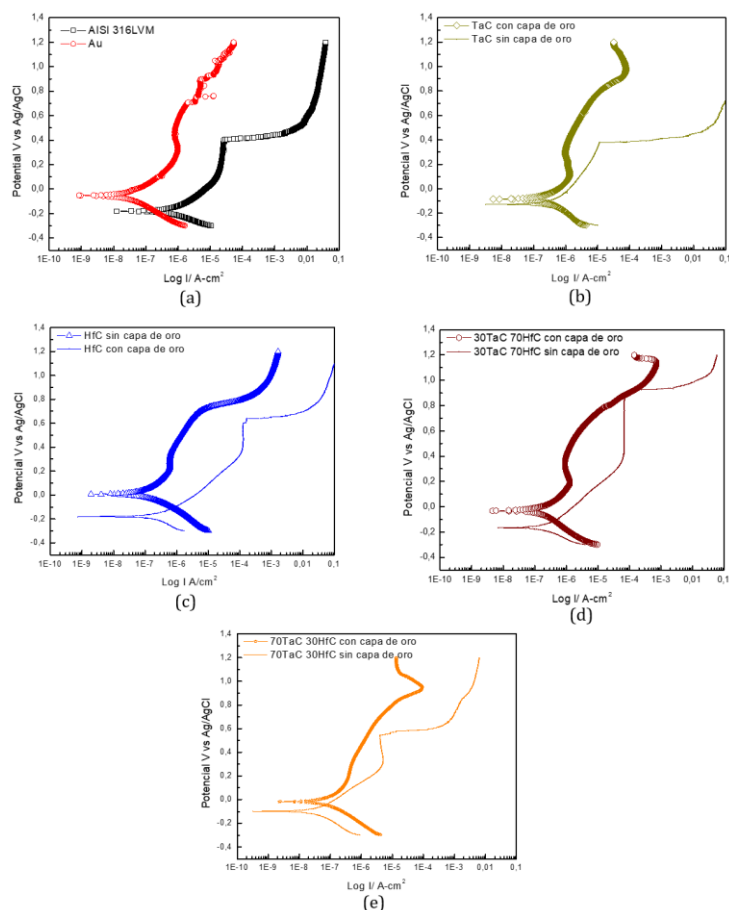


Figura 7. Curvas de polarización de los recubrimientos con y sin capa intermedia de oro

El acero 316 LVM presenta deficiencia a la resistencia a la corrosión por cloruros (Figura 7a) (corrosión por picadura), ya que el ataque se localiza en un área muy reducida profundizando con mucha mayor rapidez, se genera un incremento de la densidad de corriente de corrosión a un mismo potencial. Este tipo de ataque sólo se produce cuando el material opera a un potencial (potencial de corrosión, E_{corr}) superior a un cierto valor crítico, que se conoce como potencial de picadura (E_{pic}). Su valor depende de composición del material metálico, y en el caso de los recubrimientos del efecto de barrera que disminuye el proceso de corrosión en el sustrato, lo cual se evidencia en el aumento del potencial de corrosión para cada carburo o porcentaje de mezcla. Es decir, que se forman capas protectoras haciendo más positivo el potencial de corrosión.

Los valores de potencial de picadura son diferentes, debido a que los recubrimientos producidos generan un comportamiento en el interior de la capa pasiva, ya que con este tipo de anión (Cl^-) se produce el desarrollo de picaduras debido a que no se llega a superar el potencial de picadura, esto conlleva a un crecimiento de picaduras estables, este valor define, por tanto, el potencial máximo al que puede operar el recubrimiento ya que se favorece la propagación del ataque hacia el interior del material, estos valores son para el TaC= 0.38 V vs Ag/AgCl (Figura 7b), 0, 63 V vs Ag/AgCl HfC (Figura 7c), 0,58 V vs Ag/AgCl para la mezcla de 70TaC-30HfC (Figura 7d) y 0.92 V vs Ag/AgCl para 30TaC-70HfC (Figura 7e). El comportamiento de estos carburos depende principalmente de la diferencia de potencial entre ellos, de este modo, los carburos de Hafnio son electroquímicamente más nobles que el carburo de Tántalo, por lo que al combinarlos el HfC trabaja como cátodo mientras que el TaC circundante se disuelve al actuar como ánodo [8].

La capa de Oro mejora la resistencia a la corrosión, aunque la estabilidad de estos materiales depende también del contenido de carburo. Sin embargo, es un sistema adecuado para mejorar su resistencia a la corrosión en solución láctica de Ringer (corrosión por picadura), se disminuye en todos los casos de forma significativamente la resistencia al ataque localizado debido a su marcado carácter noble, debido a la naturaleza electroquímica por lo tanto son más resistentes a la corrosión en una solución con contenido de ion cloruro. Por lo que este aumento se podría justificar por la falta de homogeneidad de la capa de óxido, así como por la presencia de poros en la superficie, que contribuyen a acelerar el proceso de degradación química y, por tanto, a alcanzar una mayor velocidad de liberación de iones níquel, presentes en la capa de transición, e iones cromo, en la capa pasiva

3.3 Microscopía electrónica de barrido

En la Figura 8, el sustrato de acero 316 LVM presenta el fenómeno típico de corrosión por picadura sobre la superficie, como respuesta natural del sistema sometido a solución salina de NaCl al 3.5% [1], esto se evidencia en la micrografía, corroborando la información obtenida en las curvas de polarización potenciodinámicas que se realizaron previamente.

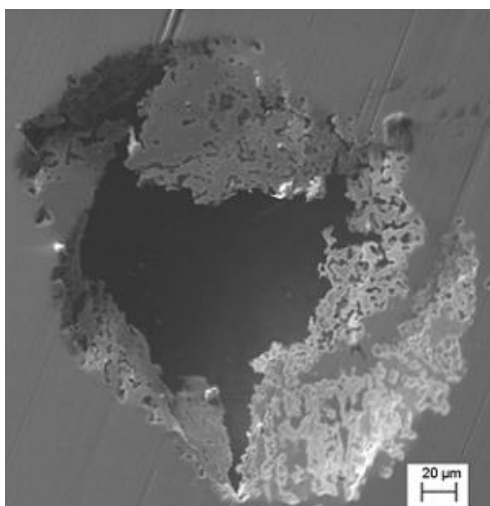


Figura 8. Micrografía de la superficie deteriorada luego del ensayo de corrosión para el metal usado como sustrato

Para realizar un mejor análisis sobre el área de interés, se efectúa una medición por EDX sobre dos zonas para obtener mayor información acerca de los fenómenos ocurridos sobre la superficie del material. Es necesario tener en cuenta que, si la variación en los porcentajes atómicos no es significativa entre una zona y otra, esto se podría atribuir a la distribución heterogénea del material y además que el área de análisis en este tipo de ensayo es muy puntual y está limitada por una zona muy pequeña. Sin embargo, si existe una variación considerable es necesario enfocarse en factores externos como modificaciones químicas o físicas que alteran la superficie del material. En este caso posterior a un ataque corrosivo se presenta una disminución considerable para elementos como Fe, Cr y un aumento de Oxígeno Tabla 1, indicando una degradación por procesos de oxidación superficial y se correlaciona con mayores niveles de O en lugares en donde existe un mayor deterioro [9].

Tabla 53. Porcentaje elemental presentes en las áreas que presentan desgaste correspondiente al sustrato

Elemento	Espectro I	Espectro II
	% Atómico	% Atómico
C	15.45	18.65
O	3.02	5.81
Si	1.12	1.02
Cl	0.51	1.23
Cr	16.68	14.60
Mn	1.35	1.21
Fe	55.03	49.39
Ni	5.86	5.20
Cu	0.97	2.89
Total	100	100

Asimismo, se encontró un porcentaje atómico de C considerado alto para un acero 316L, sin embargo, la presencia de este elemento se puede atribuir a la preparación de la muestra, ya que para poder realizar los ensayos es necesario que la muestra presente un acabado superficial denominado *brillo espejo*. Es necesario realizar una modificación superficial por medio de un proceso de pulido en donde se inicia con una lija con un tamaño de grano de 80 y se finaliza con un paño y partículas de alúmina de 0.3 μm . A causa del proceso de pulido se presenta un aumento en la temperatura de la muestra lo cual podría concluir con un proceso de difusión intersticial de los átomos de carbono que migran a la superficie, este elemento debido a que el Carbón presenta un radio atómico menor al Cr y el Fe por lo cual facilita la difusión y en la medición de EDX se evidenciaría una cuantificación mayor de este elemento.

3.3.1 Au

En la Figura 9, se observa la superficie del recubrimiento de oro, se repite el procedimiento realizado con la muestra de 316L (figura 8), en la zona 1 de análisis se observa una superficie homogénea y sin presencia de deterioro a causa de los procesos corrosivos desarrollados sobre el material, por EDX se evidencia un alto contenido en peso atómico de O y que está relacionado a una respuesta química de óxido-reducción en la cual el Oro al presentar potenciales más positivos y ser considerado un material noble, se dificulta el proceso de reacción con el O permitiendo así la acumulación del mismo sobre la superficie. Conjuntamente se observa disolución generada por el lactato de Ringer al presentar partículas en la superficie del material atribuidas a la solución salina puesto que se encuentran elementos como K, Na, Cl y Ca, en la Tabla 2, no presenta un contenido en peso atómico elevado en comparación al Oro y una presencia baja del Cr componente del sustrato se podría concluir que no existe daño aparente más que el presentado en forma de líneas y que está relacionado al proceso de pulido previo a la deposición de la película delgada.

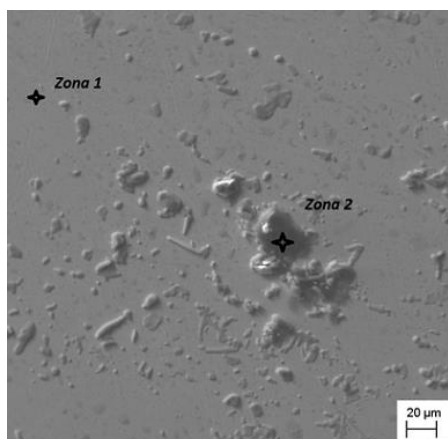


Figura 9. Micrografía de la superficie expuesta a fluidos que simulan las condiciones del cuerpo humano, se observan dos zonas con un leve deterioro

Tabla 2. Porcentaje elemental presentes en las áreas que presentan desgaste correspondiente al recubrimiento de Oro

Elemento	Espectro I	Espectro II
	% Atómico	% Atómico
O	59.46	8.39
K	1.85	-
Na	11.58	44.18
Cl	1.63	43.95
Cr	0.71	-
Au	31.33	2.74
Si	-	0.74
Ca	4.1	-
Total	100	100

En la zona 2 de análisis Figura 9, se realiza la medición de EDX sobre una de las partículas en la superficie para corroborar su naturaleza, encontrando altos contenidos de Na y Cl, por su parte el O y el Au presenta una disminución considerable con respecto a la zona anterior, interpretando así la formación de partículas salinas en la superficie de análisis.

3.3.2 TaC

El comportamiento presentando en la muestra de TaC fue muy similar a los exhibidos por la película de Au, en la que se presenta una superficie base, homogénea y sin rastros de daños generados por los procesos corrosivos, y sobre la cual se generaron partículas que se atribuyen a la solución Figura 10.

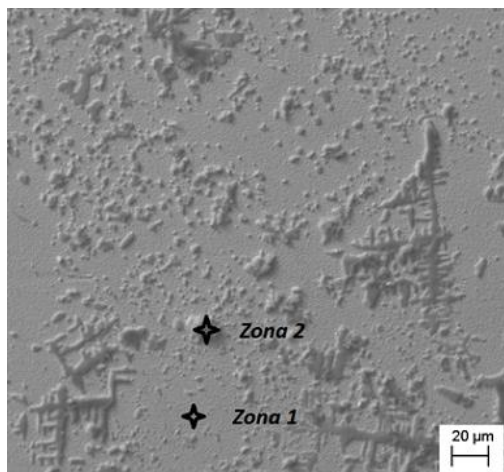


Figura 10. Micrografía de la superficie de carburo de tantalio expuesta a fluidos que simulan las condiciones del cuerpo humano, se observan dos zonas con un leve deterioro

En la zona 1 de análisis se selecciona un área en la cual no se percibe partículas en la superficie, en esta se encontró una alta composición en peso atómico de C seguido por Ta, Cl, Na y O Tabla 3. Los altos niveles medidos de C podrían estar relacionados a la deposición de los carburos, además de los factores como el calentamiento de la probeta hasta 300°C en el proceso de deposición y la migración de átomos de C hacia la superficie.

Tabla 3. Porcentaje elemental presentes en las áreas que presentan desgaste correspondiente al Carburo de Tantalio.

Elemento	Espectro I	Espectro II
	% Atómico	% Atómico
C	45.20	-
O	6.85	9.22
Na	10.64	37.30
Cl	12.22	37.95
Ta	25.10	13.98
Ca	-	1.03
K	-	0.52
Total	100	100

En el segundo análisis de EDX realizado a la muestra, se identificó la composición de las partículas que se encuentran sobre la superficie, corroborando si existe algún componente de Au como resultado de la degradación de la capa de TaC. Sin embargo, no se evidenció presencias ni del sustrato ni de la capa de Au, solo de elementos como Na, Ca, K Cl correspondientes a la solución con un incremento considerable con respecto a la medición en la zona 1 y la disminución del porcentaje en peso atómico del Ta.

3.3.3 HfC

En la Figura 11, se observa la superficie luego de los ensayos de corrosión la probeta recubierta de HfC presenta una degradación superficial elevada. El recubrimiento muestra evidencias de micro-agrietamiento, y en ciertos puntos se observa una disolución parcial de la película delgada. En la primera zona de análisis por EDX se evidencia una alta presencia de C, Hf y Au correspondientes a la película delgada y O generado en los procesos de oxidación, además se encuentra la presencia de Na y Cl de la solución Tabla 4. En esta zona no se aprecia un daño prolongado a la superficie sin embargo en las mediciones de EDX al igual que la muestra de solo Au, se obtiene presencia baja de Cr. La presencia del mismo se obtendría debido a que la energía implementada en el ensayo es alta y alcanza acceder hasta el sustrato.

En la segunda zona de análisis se encontró una disminución en elementos como el C, O, Na, Cl, Hf, y un aumento considerable de Au con respecto a el espectro obtenido en la zona 1, esta disminución se puede relacionar con la

disolución de la capa de los Carburos de Hafnio, lo cual deja expuesta la capa de Au incrementando el peso atómico obtenido por EDX, además por procesos de óxido-reducción se podría esperar una reacción química entre ciertos elementos lo cual disminuye su composición [10].

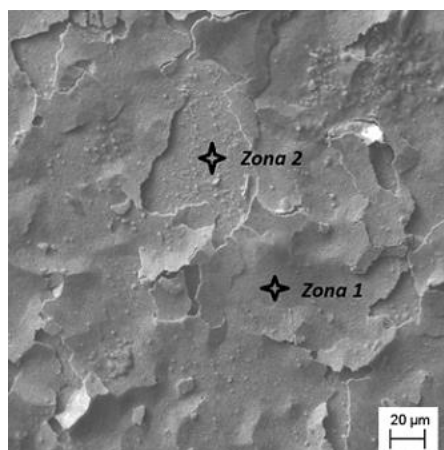


Figura 11. Micrografía de la superficie de carburo de hafnio expuesta a fluidos que simulan las condiciones del cuerpo humano, se observan dos zonas con un leve deterioro

Tabla 4. Porcentaje elemental presentes en las áreas que presentan desgaste correspondiente al Carburo de Hafnio

Elemento	Espectro I	Espectro II
	% Atómico	% Atómico
C	41.82	33.62
O	20.78	15.94
Na	3.98	1.75
Cl	5.56	2.30
Cr	0.77	1.47
Hf	22.29	10.77
Au	4.80	33.22
Total	100	100

3.3.4 30TaC 70HfC

En la Figura 12 se presenta la micrografía obtenida para la muestra de 30TaC 70HfC, en la cual se observa una superficie que para algunas zonas es homogénea y no presenta daño aparente en la superficie, asimismo en otras zonas se aprecia partículas remanentes posterior a los ensayos de corrosión. En la Tabla 5 se observa los resultados de la medición por EDX en la que se presenta porcentaje atómico de Hf y Ta relacionados con la película delgada, Cl y Na atribuidos a la solución y O debido a las reacciones de óxido-reducción.

En la zona 2 del análisis al igual que la muestra de solo HfC, se presenta una disolución de la capa de carburos de Hafnio y Tantalio y que se relación con los valores obtenidos por EDX para la segunda zona, se observa una disminución considerada alta para este caso de estudio para elementos como el Na, Cl, Hf, Ta. Con la aparición de Au se corrobora la disolución parcial en ciertas zonas de la capa de 30TaC 70HfC adjudicada a procesos de corrosión, pero, aunque se presenta una disolución de la capa de 30TaC 70 HfC y una alta presencia del Au no se evidencio la presencia del Cr o Fe de lo cual se podría concluir que la capa de Au permite mejorar el comportamiento en procesos corrosivos y presentar una mejor resistencia a los mismo.

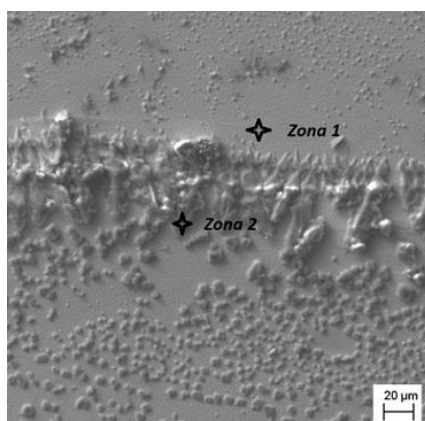


Figura 12. Micrografía de la superficie de la mezcla de carburo de 30 carburo de tantalio y 70 carburo de hafnio, expuesta a fluidos que simulan las condiciones del cuerpo humano, se observan dos zonas con un leve deterioro

Tabla 5. Porcentaje elemental presentes en las áreas que presentan desgaste correspondiente al 30 carburo de tantalio y 70 carburo de hafnio

	Espectro I	Espectro II
Elemento	% Atómico	% Atómico
O	15.65	22.4
Na	23.43	18.6
Cl	33.22	15.04
Cr	0.75	-
Hf	19.93	7.06
Ta	7.02	1.07
Au	-	35.83
Total	100	100

3.3.5 70TaC 30HfC

En la micrografía obtenida por el MEB Figura 13, la muestra exhibe la porosidad que tiene el TaC, atribuido a las características intrínsecas de este elemento, asimismo, presenta una superficie homogénea y sin rastros de deterioro, en la superficie se generó una disolución de partículas y por medio de la técnica EDX se obtuvo la tabla xx que muestra el resultado de las dos zonas de análisis.

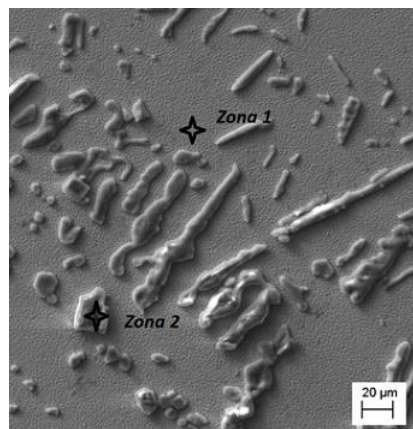


Figura 13. Micrografía de la superficie de la mezcla de carburo de 70 carburo de tantalio y 30 carburo de hafnio, expuesta a fluidos que simulan las condiciones del cuerpo humano, se observan dos zonas con un leve deterioro

En la zona 1 de análisis se presentó altos contenidos de Na y Cl atribuidos a la solución, además la presencia de Ta y Hf de la película delgada y O que se encuentra en la solución y en los procesos de óxido-reducción (Tabla 6). La ausencia del Au indica que los procesos corrosivos no fueron lo suficientemente agresivos como para degradar la capa de Ta y Hf. En la segunda zona de análisis se evidencia el incremento en el porcentaje atómico de Na y Cl, con lo cual se podría concluir que en esta zona se encuentra una partícula salina debido a la ausencia de los otros elementos encontrados en la zona 1. La ausencia de C en estas mediciones se atribuye a la limitada área que se puede analizar por medio de la técnica de EDX.

Tabla 6. Porcentaje elemental presentes en las áreas que presentan desgaste correspondiente al 70 carburo de tantalio y 30 carburos de hafnio

	Espectro I	Espectro II
Elemento	% Atómico	% Atómico
O	17.78	-
Na	22.83	39.67
Cl	31.80	60.28
Hf	8.91	-
Ta	18.69	-
K	-	0.04
Total	100	100

4. CONCLUSIONES

En algunos puntos de los difractogramas como por ejemplo el TaC, o el HfC se evidenció del difractograma un corrimiento de los picos obtenidos con respecto a los patrones de las bases de datos, es posible concluir que debido a micro deformaciones de compresión o tensión generada en la película delgada a causa del proceso del magnetron sputtering, se producen corrimientos ocasionados por atribuidos a la deformación de los cristales. Aunque se presenten corrimientos, por medio de las reflexiones más altas presentadas por los patrones de difracción en las bases de datos de la ICSD y COD es posible correlacionarlos con el difractograma a partir de identificaciones puntuales en cada uno de los ángulos en 2θ .

Las modificaciones superficiales realizadas al sustrato para obtener las condiciones ideales en la deposición de películas delgadas pueden generar cambios en la composición superficial del material y estas deben ser tenidas en cuenta para análisis posteriores, los recubrimientos con capa de oro intermedia son los materiales idóneos para atenuar los daños presentes en problemas de corrosión que se pueden presentar, generando un material que se aplica en el campo de los biomateriales.

Agradecimientos

Este estudio fue apoyado por Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, número de proyecto INV ING-2992, validez 2019.

REFERENCIAS

- [1] N. A. Levis, D. W. Pfennig, "Phenotypic plasticity, canalization, and the origins of novelty: Evidence and mechanisms from amphibians", *Seminars in Cell & Developmental Biology*, vol. 88, p. 80, 2019.
- [2] S. K. Hewitt, David S. Foster, Paul S. Dyer, Simon V. Avery, Phenotypic heterogeneity in fungi: Importance and methodology, *Fungal Biology Reviews*, vol 30, Issue 4, p. 176, 2016.
- [3] A. Hodgkinson, L. L. Cam, D. Trucu, O. Radulescu, "Spatio-Genetic and phenotypic modelling elucidates resistance and re-sensitisation to treatment in heterogeneous melanoma", *Journal of Theoretical Biology*, vol 466, p. 84, 2019.
- [4] N. Reina, J.M. Laffosse, "Biomecánica del hueso: aplicación al tratamiento y a la consolidación de las fracturas, EMC - Aparato Locomotor", vol 47, p. 1, 2014.
- [5] T. Beline, J. H.D. da Silva, A. O. Matos, N. F. A. Neto, A. B. de Almeida, F. H. Nociti Júnior, D. M.G. Leite, E. Cipriano Rangel, V. A.R. Barão, "Tailoring the synthesis of tantalum-based thin films for biomedical application: Characterization and biological response", *Materials Science and Engineering: C*, vol 101, p. 111, 2019.
- [6] G. Adamek, J. Jakubowicz, "Tantalum foam made with sucrose as a space holder", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol 53, p. 51, 2015.
- [7] M. Sowa, M. Woszczak, A. Kazek-Kęsik, G. Dercz, D. M. Korotin, I. S. Zhidkov, E. Z. Kurmaev, S. O. Cholakh, M. Basiaga, W. Simka, "Influence of process parameters on plasma electrolytic surface treatment of tantalum for biomedical applications" *Applied Surface Science*, vol 407, p. 52, 2017.
- [8] Y. Chang, H. Huang, H. Chen, C. Lai, C. Wen, "Antibacterial properties and cytocompatibility of tantalum oxide coatings", *Surface and Coatings Technology*, vol 259, p. 193, 2014.
- [9] G. Xu, X. Shen, Y. Hu, P. Ma, K. Cai, "Fabrication of tantalum oxide layers onto titanium substrates for improved corrosion resistance and cytocompatibility", *Surface and Coatings Technology*, vol 272, p. 58, 2015.
- [10] M. Sowa, A. Kazek-Kęsik, R. P. Socha, G. Dercz, J. Michalska, W. Simka, Modification of tantalum surface via plasma electrolytic oxidation in silicate solutions, *Electrochimica Acta*, vol. 114, p. 627-636, 2013.

HYNMERS: Diseño de un sistema mecánico pasivo para rehabilitación de miembros inferiores inspirado en terapia acuática

Sergio Zapata V.¹
Manuel J. Betancur²
Vera Z. Pérez³
Juan C. Yepes⁴
Juan C. Franco M.⁵

Universidad Pontificia Bolivariana – Colombia

En el contexto de la rehabilitación, la hidroterapia ha sido ampliamente promovida para el tratamiento de afecciones crónicas como artrosis, fibromialgia, control del peso, entre otros. Sin embargo, en ocasiones presenta contraindicaciones para pacientes que sufren de heridas abiertas, enfermedades infectocontagiosas, miedo al agua, entre otras; también, para el terapeuta la inmersión continua en agua puede acarrear inconvenientes ocupacionales. Como alternativa, el proyecto HYNMERS se concibe como un sistema constituido por un subsistema de realidad virtual y un prototipo mecánico pasivo, para proporcionar una sensación de ingravidez parcial en los miembros inferiores, emulando un tratamiento con terapia acuática, sin las contraindicaciones relacionadas con el contacto del agua, y presentándose como una opción más asequible a sistemas robóticos de rehabilitación. En este capítulo se presenta el proceso de diseño del subsistema mecánico pasivo, el cual se realiza a través de la identificación de los requerimientos del equipo, una búsqueda de alternativas que supliesen las condiciones de diseño y la ejecución de un proceso de conceptualización inicial, sobre el cual se desarrolló un constante proceso de rediseño y revisión, teniendo en cuenta la movilidad y anatomía del cuerpo humano, así como las posibles limitaciones constructivas y de ensamblaje. Para satisfacer el criterio de que el sistema no fuera motorizado, y aun así permitiese al usuario realizar ejercicios sin luchar contra la gravedad, se diseñó un sistema basado en poleas y contrapesos que permite la compensación del peso de los miembros inferiores y la ubicación de las poleas de acuerdo a la estatura del paciente; también facilita los movimientos de abducción y aducción de piernas. Es modular y fácil de ensamblar. Se presenta el prototipo fabricado y pruebas iniciales desarrolladas sobre el sistema, las cuales demuestran que este se encuentra en condiciones para continuar con fases posteriores de prueba con personas sanas y, eventualmente, con pacientes.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen diversos casos de lesiones y patologías a nivel mundial que requieren de un proceso de rehabilitación física. Hay diversos tipos de rehabilitación, como la terrestre y la acuática, algunas de ellas, como la hidroterapia, incursionan cada vez con más fuerza y presentan un gran atractivo y potencial [1]. La terapia acuática, ha sido promovida por siglos con fines de rehabilitación [2]. La palabra se ha utilizado para describir una amplia gama de acciones, de las cuales la mayoría pertenecen a actividades terapéuticas y de ejercicio realizadas en piscinas climatizadas, se utiliza principalmente en entornos clínicos para el tratamiento, la rehabilitación y el manejo de afecciones crónicas como osteoartritis (OA) y fibromialgia, para el control del peso, entre otros. Actualmente, esta práctica también está ganando popularidad en entornos deportivos en áreas tales como rutinas de recuperación y para la rehabilitación de lesiones musculoesqueléticas agudas [3], [4]. El objetivo principal de la hidroterapia es ayudar a la rehabilitación de la función neurológica, musculoesquelética, cardiopulmonar y psicológica del individuo, con ejercicios que minimicen el impacto y favorezcan una terapia sin inconvenientes por el peso y otras condiciones fisiológicas del paciente. En algunos casos también ayuda a prevenir lesiones [5].

De hecho, es importante mencionar que la terapia acuática tiene ciertas contraindicaciones, por ejemplo, heridas abiertas, enfermedades infectocontagiosas, miedo al agua, cardiopatías descompensadas, bronquitis crónica descompensada, enfermedades micóticas, hipertensión arterial y varices, estados de debilidad extrema, enfermedades neurológicas o secuelas que imposibiliten la permanencia en la piscina [5]. Por otro lado, dentro del contexto del desarrollo de sistemas robóticos y mecatrónicos, los mecanismos de compensación gravitacional han sido ampliamente investigados, con el fin de reducir las cargas a los actuadores, siendo empleado en diferentes clases de robots, incluyendo sistemas utilizados en rehabilitación. Estos equipos generalmente hacen uso de mecanismos que cuentan con resortes para permitir, que independiente del ángulo de la articulación del robot, se logre disminuir el torque efectuado por la gravedad [6], [7].

En la rehabilitación de patologías de miembros inferiores o superiores, se suelen usar sistemas acoplados a las extremidades de la persona [8], [9], siendo exoesqueletos activos o pasivos, que en ocasiones hacen uso de sistemas de auto cancelación de la gravedad, como es el caso del prototipo desarrollado por Banala et al. [10], cuyo mecanismo cuenta con resortes embebidos en una estructura de soporte, que se conecta con el muslo y pantorrilla del sujeto. A pesar de ser sistemas que se integran directamente con la persona, por lo general se usan mecanismos con cables para redirigir y compensar las fuerzas de las extremidades, como es el caso de MEDARM, desarrollado por Ball et al. [11], [12], que es utilizado para la rehabilitación de lesiones en miembros superiores.

¹ sergio.zapatave@upb.edu.co

² manuel.betancur@upb.edu.co

³ vera.perez@upb.edu.co

⁴ juancamilo.yepes@upb.edu.co

⁵ juan.franco@upb.edu.co

En sistemas destinados para la rehabilitación, son también encontrados mecanismos más sencillos, que hacen uso de poleas y cables para producir una compensación gravitacional de las extremidades [13], como es el caso del sistema Freebal, desarrollado por Arno et al. [14], que hace uso de cuatro poleas y cables, que sostienen el codo y mano del paciente, y que conecta con un mecanismo de resortes. Similarmente, el sistema de rehabilitación para marcha, elaborado por Alamdari & Krobi [15], implementa un sistema con cuerdas para mover un exoesqueleto a través de motores, localizados en una estructura aparte, permitiendo una mayor libertad de movimiento a la persona.

La compensación gravitacional, a través de mecanismos pasivos, ha sido también foco de investigación en el campo aeroespacial. En este sentido, los trabajos abordan técnicas y mecanismos para emular las condiciones del espacio en equipos y en el cuerpo humano, haciendo uso generalmente de sistemas de poleas, cables y contrapesos [16] – [19]. En especial, para emular la ausencia de gravedad en la persona, se hace uso de arneses conectados al cuerpo a través de trajes especiales, que comunican los cables con todo el sistema de compensación [20] – [22].

En el Grupo de Investigaciones en Bioingeniería, el Grupo de Automática y Diseño A+D y el Grupo de Investigación Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática (GIDATI), de la Universidad Pontificia Bolivariana, se busca el desarrollo de nuevos métodos y procedimientos para la rehabilitación de patologías en miembros inferiores, dada su alta incidencia a nivel mundial. Se han explorado principalmente soluciones en torno a sistemas robóticos de rehabilitación de miembros inferiores [23], [24]. HYNMERS, por el contrario, es concebido como un sistema mecatrónico sin actuadores, el cual está compuesto por un subsistema de realidad virtual, que incluye sensores de movimiento y un visor, y un subsistema mecánico pasivo, con el cual se crea la sensación de ingravidez en los miembros inferiores, emulando ese aspecto de la sensación de inmersión de una hidroterapia sin las contraindicaciones relacionadas con el contacto del agua. El proyecto tiene un componente importante de desarrollo tecnológico, en torno a un sistema de un costo menor a otros equipos mecatrónicos de rehabilitación, y un gran potencial para tener un impacto social, en el tratamiento de patologías de miembros inferiores.

El presente capítulo se centra en el proceso de desarrollo del sistema mecánico pasivo para rehabilitación, describiéndose especialmente, en la Sección 2, la metodología llevada a cabo en torno a su diseño, para lograr un mecanismo que proporcionase una compensación gravitacional de los miembros inferiores, similar a la sensación de ingravidez obtenida en la terapia acuática. En la Sección 3, se presentan los resultados obtenidos, en los cuales se incluye el proceso de ideación y conceptualización, pasando por su diseño final y fabricación, y terminando en algunas pruebas experimentales iniciales, desarrolladas sobre el prototipo construido, para luego proceder con la discusión. Finalmente, en la Sección 4, se reportan las conclusiones respecto al subsistema mecánico.

2. MÉTODO

Con base al análisis de sistemas de compensación gravitacional, como los presentados anteriormente, se dio inicio al desarrollo del prototipo mecánico para rehabilitación HYNMERS, el cual contó con cinco etapas principales, que comprendió: una definición en detalle de los requerimientos y características del sistema, un análisis del comportamiento del mecanismo en simulación, un proceso de diseño, un proceso de fabricación y una etapa de pruebas iniciales.

La definición en detalle de los requerimientos y características del sistema fue un proceso realizado teniendo en cuenta el criterio de fisioterapeutas e ingenieros en el área de la salud y terapia acuática, así como de visitas a centros de rehabilitación, en donde se identificaron las principales características concernientes al prototipo mecánico, así como los métodos y ejercicios de la terapia acuática tradicional, que pudiesen ser desarrolladas sobre este.

La condición inicial de diseño del sistema yace en la ideación de un mecanismo con el cual se pretende crear una sensación de ingravidez parcial en los miembros inferiores de una persona. Además, se tiene en cuenta que el sistema mecánico no sea invasivo, no tenga posibilidad de someter al usuario a una violación de su rango de movimiento articular (*Range Of Motion* ROM) y no genere ejercicios de impacto en sus extremidades. Con base a la identificación de los requerimientos del sistema, y teniendo definidas las características básicas del mecanismo, se procede a desarrollar una simulación en Matlab® para analizar su comportamiento y su interacción con la persona, durante el proceso de rehabilitación. En este sentido, se evalúa la capacidad para proveer una auto-cancelación satisfactoria de la gravedad, al realizarse diferentes tipos de ejercicios inspirados en terapia acuática. Además, esta etapa es fundamental para definir otros elementos a tener en cuenta en el proceso de diseño.

El proceso de diseño, recolecta la información obtenida de las etapas anteriores, buscado suplir los requerimientos identificados y las principales características del sistema. Este se inicia con una fase de ideación, en la cual se desarrollan inicialmente bosquejos del prototipo, para luego proceder a una fase de conceptualización, en un proceso iterativo de diseño, evaluación y rediseño, teniendo en cuenta el criterio de los implicados en la investigación, hasta obtener un resultado satisfactorio. A partir de la última versión del diseño conceptual, se continúa con el diseño de detalle, el cual tiene en cuenta todos los elementos a ser utilizados y su integración en el prototipo. La etapa de fabricación comprende todo lo relacionado con corte y mecanizado de piezas, como vigas, ángulos, platinas, entre

otros. También se incluye el proceso de ensamble, de soldadura, y de montaje en su lugar final de operación, instalando cada uno de los módulos con los respectivos pernos de fijación. Además, se consideran los sistemas de contrapesos a ser utilizados y su disposición en el prototipo.

Por último, una etapa de pruebas iniciales es desarrollada, con el fin de evaluar los principales componentes del mecanismo, la concordancia del prototipo construido con los diseños y, fundamentalmente, la capacidad de lograr una compensación gravitacional de los miembros inferiores, siendo evaluada la fuerza necesaria para lograr el movimiento de las extremidades.

3. RESULTADOS

Con base a la metodología planteada, se procede a desarrollar cada una de las etapas, las cuales son presentadas y explicadas a continuación.

3.1 Definición de requerimientos y características de HYNMERS

En el proceso de definición de los requerimientos y características del sistema, se evaluaron inicialmente diversas posibilidades en torno al sistema, así como las diferentes condiciones de uso y operación. Entre las principales cuestiones a decidir se encontraba si el sistema estaría integrado al lugar de operación o si sería auto sostenido, es decir, con una estructura independiente que sostuviese todo el mecanismo. Debido a que el lugar de operación puede cambiar, el prototipo podría requerir ser trasladado de un centro de rehabilitación a otro o incluso de un consultorio a otro. Adicionalmente, como se pretende que el sistema en un mediano plazo pueda ser comercializado, es menos complejo tener un mecanismo que sea transportable y auto sostenido.

Por otro lado, el modo en que se crearía la sensación de ingravidez también fue un punto fundamental en el diseño del prototipo, considerándose las opciones de utilizar bandas elásticas como en el caso reportado por Dhruv Jain [22] o poleas con contrapesos, sin embargo, las últimas son escogidas, debido a que pueden mantener una sensación de ingravidez más homogénea en la mayor parte del ROM de la persona [18]. Específicamente, este sistema funciona con cuerdas, elegidas de un material de muy baja elasticidad, alta resistencia y pequeño radio de giro, con un lado conectado a la extremidad del paciente y el otro a un contrapeso, siendo estas cuerdas dirigidas a través de un conjunto de poleas en la estructura auto sostenida.

Con base a las consideraciones anteriores y a la revisión general de las principales características que requiere el sistema de rehabilitación HYNMERS, junto con el análisis para generar la sensación de ingravidez, se obtuvo un listado de requerimientos y características iniciales, condicionales para el diseño, que se presentan a continuación:

1. El prototipo debe ser auto sostenible e independiente.
2. Debe ser modular para un fácil transporte y ensamblaje.
3. De acuerdo al lugar de instalación, se presentan límites en las dimensiones de la estructura, siendo máximo de 2.19 m de alto y 0.92 m de ancho.
4. Hará uso de poleas, cuerdas y contrapesos, para generar la sensación de ingravidez parcial en los miembros inferiores.
5. Contará con cuatro cuerdas, las cuales van a sostener los segmentos cadera/rodilla y rodilla/tobillo de ambas piernas. Las cuerdas del segmento cadera/rodilla compensarán gravitacionalmente los muslos y las cuerdas de los segmentos rodilla/tobillo compensarán gravitacionalmente el segmento de la pantorrilla y el pie. Adicionalmente se realizará otro sistema de contrapesos para la compensación gravitacional de la cabeza.
6. La sujeción de los segmentos corporales debe realizarse en la zona medial, *i.e.*, donde se ubique aproximadamente su centro de masa, con el fin de evitar su sujeción en puntos distales (rodilla, tobillo), que puede ser imposibilitado en cierto tipo de lesiones, como en fracturas de platillos tibiales.
7. Se planea realizar la estructura del prototipo con marco de aluminio estructural de un mínimo de 2" o en acero estructural, que soporte las cargas a las que será sometida la estructura.
8. El sujeto se ubicará en una camilla en decúbito prono o supino, *i.e.*, tendido boca abajo o boca arriba.
9. Se planea que el marco de aluminio estructural o las vigas de acero posean un riel, de donde se colgarán las poleas, de modo que estas se puedan mover manualmente para configurar el sistema para cada persona, de acuerdo a la longitud de cada uno de sus segmentos corporales.
10. Se planea utilizar poleas con rodamientos y preferiblemente pequeñas, que cumplan con los requerimientos del peso a sostener.
11. Se planea utilizar un tipo de freno para sujetar las cuerdas, en el momento en el que el sujeto se está ubicando en el sistema, evitando la sujeción de dichos contrapesos manualmente.

12. Se plantea utilizar cuerdas de calidad, de alta resistencia y poca elongación, de modo que con una cuerda de un diámetro menor se puedan cumplir los requerimientos del peso.
13. Se explorará adicionalmente la posibilidad de agregar un mecanismo que permita la abducción y aducción de las piernas, siendo estas pasivas y sin ninguna clase de compensación.

3.2 Análisis y simulación del mecanismo de HYNMERS

Con el fin de analizar el comportamiento del sistema de poleas, se desarrolla inicialmente un programa en Matlab® que permite ingresar las características del usuario, como peso y estatura, y configurar la posición de las poleas. El programa entrega el porcentaje del peso compensado gravitacionalmente, tanto en la componente vertical como horizontal, igualmente se genera una representación gráfica del mecanismo, incluyendo poleas y cuerdas, así como al sujeto con sus respectivas dimensiones.

Se simulan tres tipos de ejercicios inspirados en terapia acuática, con los cuales se busca analizar el porcentaje de ingravidez generado y la posición de las poleas que producen un menor ángulo de apertura de las cuerdas, es decir, el ángulo de la cuerda respecto a la vertical. En general, entre menor sea este ángulo, se produce una menor componente de fuerza horizontal, que puede afectar la sensación de ingravidez del sujeto o ser incómoda para el mismo. Asimismo, estas características son analizadas para la sujeción medial y distal de las cuerdas en los segmentos corporales de pantorrilla y muslo.

El programa automáticamente ubica, en la zona superior de la estructura, las poleas de rodilla y tobillo, de tal forma que estas produzcan un ángulo de apertura simétrico en la cuerda cuando el sujeto mueva su extremidad inferior en todo el ROM configurado.

La primera simulación analizada corresponde a un escenario en el cual el sistema es utilizado por un sujeto sano, con plena capacidad de movilizar sus miembros inferiores en todo su ROM. Dicho sujeto posee la estatura máxima para la cual es contemplada la estructura, correspondiente a 1.85 m. Esta simulación permite conocer los límites máximos de operación del sistema, debido a que un paciente durante un proceso de rehabilitación no logra el mismo ROM.

En las Figura 1 y 2 se observa la representación gráfica del sistema con los respectivos ángulos máximos generados para las poleas de tobillo y rodilla para el caso de la sujeción medial y distal, respectivamente. Se debe tener en cuenta que el sistema de referencia de la simulación tiene su origen en la cadera del sujeto. En esta prueba, el programa configura automáticamente el ROM del sujeto, que produce la máxima desviación en el ángulo de la polea.

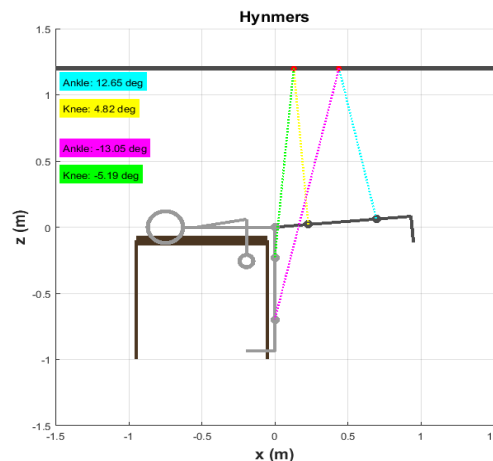


Figura 1. Representación de primera simulación con sujeción medial

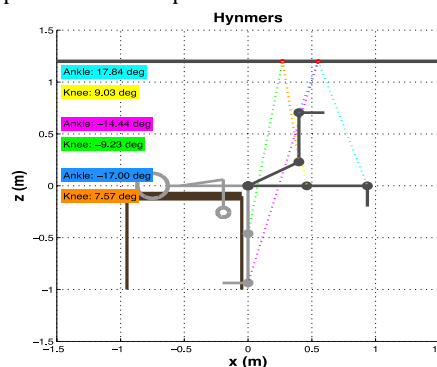


Figura 2. Representación de primera simulación con sujeción distal

De los dos tipos de sujeción evaluados, se pudo observar que el ángulo en las poleas es menor para la sujeción medial, disminuyendo la pérdida de sensación de ingravidez por fuerzas en componentes horizontales. En la Tabla 1 se presentan los parámetros utilizados para la simulación, así como los resultados obtenidos para la sujeción medial.

Tabla 1. Resultados y parámetros de la simulación para la prueba 1

Característica	Valor
Estatura sujeto (m)	1.85
Ángulo máximo en polea tobillo (°)	12.65
Ángulo mínimo en polea tobillo (°)	-13.05
Ángulo máximo en polea rodilla (°)	4.82
Ángulo mínimo en polea rodilla (°)	-5.19
Porcentaje de ingravidez vertical en tobillo (%)	97.42
Porcentaje de ingravidez horizontal en tobillo (%)	22.58
Porcentaje de ingravidez vertical en rodilla (%)	99.59
Porcentaje de ingravidez horizontal en rodilla (%)	9.05
Posición polea de tobillo (m)	0.44
Posición polea de rodilla (m)	0.13

De los resultados obtenidos se puede observar que el mayor ángulo se produce en la polea del tobillo, debido al amplio ROM que se puede tener en dicho punto, ocasionando un fuerza del 22.58 % del peso del segmento corporal en una componente horizontal, sin embargo, el porcentaje de fuerza en su componente vertical no se ve afectado considerablemente, siendo la sensación de ingravidez de 97.42 % del peso del segmento corporal, es decir, si el segmento de pantorrilla y pie, el cual es sostenido por la polea de tobillo, pesa alrededor de 10 kg, la fuerza que contrarresta ese peso, generado por el mecanismo, es de 9.7 kg, siendo percibido por el sujeto como si dicho segmento pesara 0.3 kg aproximadamente. Respecto a la polea de rodilla esta posee poco movimiento, siendo de máximo 5.19° en uno de sus sentidos, permitiendo una sensación de ingravidez del 99.59 %.

La segunda simulación se realizó con las mismas características del sujeto y con sujeción medial, sin embargo, con la ejecución de ejercicios tipo buceo, en el cual el ROM de la cadera no supera los 45°, de esta forma se disminuye la amplitud total en el movimiento de los contrapesos. La representación gráfica se observa en la Figura 3.

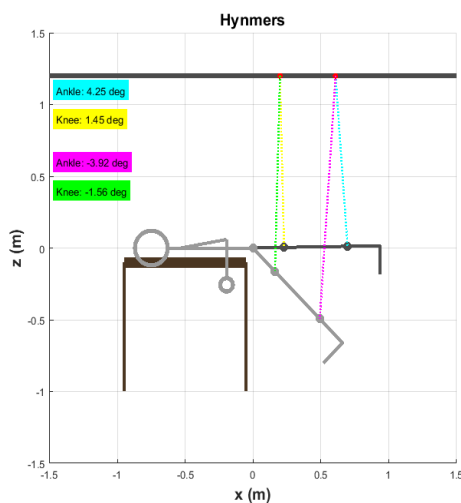


Figura 3. Representación gráfica de segunda simulación con sujeción medial

Los resultados de la segunda prueba, indican que la sensación de ingravidez es levemente afectada en los segmentos inferiores del paciente, debido al limitado movimiento del ejercicio planteado. En este sentido, el ángulo de apertura de las cuerdas es mínimo, presentando el del tobillo una desviación máxima de 4.25° y la rodilla de 1.56°, generándose una compensación del 99.73 % y del 99.96 %, respectivamente.

Una última simulación fue desarrollada teniendo en cuenta un ejercicio realista de terapia acuática, tipo natación, en el cual la articulación de la cadera no supera los 15° en flexión y extensión, y que sería comúnmente empleado en las terapias con HYNMERS. En la Figura 4 se muestra la representación gráfica de esta prueba. Los resultados demuestran que ante un menor movimiento de las piernas el ángulo que se genera en las poleas es mínimo, siendo para ambas poleas entre 0.016° y 1.35°. De esta forma, la sensación de ingravidez es del 100%, aproximadamente.

Con los resultados obtenidos se descarta la presunción inicial de emplear un mecanismo de compensación en el movimiento de la polea, de tal forma que siempre estuviese alineada con el punto de sujeción del paciente y produjese un ángulo de desviación de 0° en la cuerda. Lo anterior debido, a que como se observó en las pruebas, con solo fijar la polea en la posición adecuada, e indicada por el programa, la desviación es mínima para ejercicios inspirados en terapia acuática y no afecta la sensación de ingravidez del sujeto.

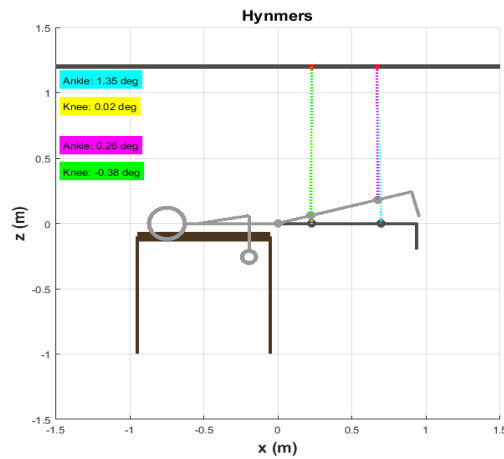


Figura 4. Representación gráfica de tercera simulación con sujeción medial

3.3 Proceso de diseño de HYNMERS

Con las condiciones de diseño planteadas se desarrolló un proceso de ideación de alternativas que lograsen suplir las condiciones de diseño. De esta manera se comienza con diseños conceptuales, los cuales se van modificando en un proceso de rediseño y revisión, por parte de un grupo interdisciplinario.

3.3.1 Versión 1 del diseño conceptual

Para el desarrollo del diseño inicial se comenzó con un bosquejo a mano del prototipo el cual contaba con las siguientes características principales:

- Sistema compacto y transportable.
- Estructura en tubería de acero de 50 x 30 mm (se descarta el uso de aluminio estructural).
- Pie-amigos y soportes en x que brindan mayor robustez a la estructura.
- Se emplean en total 10 poleas, de un diámetro de 29 mm.
- El sistema se encuentra centrado en el punto fijo de la cadera.
- Se permite leve abducción y aducción de piernas.
- Se diseña con 9 tubos de contrapesos para futura implementación de brazos.
- Tubos de contrapesos embebidos en estructura.
- Rodachinas de 50 mm, en 6 puntos de la estructura para transporte.
- Tamaño ideal para ingresar por puertas y dimensiones acorde a los requerimientos de diseño.
- Instalación en edificios debe realizarse a través de malacate (El sistema no es modular).
- Diseñado para personas entre 1.40 m y 1.85 m.

Posteriormente, en un programa CAD se procede a elaborar el diseño del prototipo conceptual, el cual se observa en la Figura 5, y sobre el cual fue posible hacer un análisis más detallado por parte del grupo interdisciplinario. A pesar de ser un diseño conceptual, la estructura se concibe con acero estructural comercial.



Figura 5. Versión 1 del diseño conceptual de HYNMERS

Las observaciones a este primer diseño estuvieron centradas en la sobredimensión de los soportes de la estructura, siendo demasiado compacta y difícil de trasladar hasta el punto de operación. Entre otros puntos se encuentra:

- Los tubos para los contrapesos pueden ser de menor tamaño
- Se requieren soportes para lectores del sistema de realidad virtual Oculus Rift
- Se puede disminuir el tamaño general de la estructura
- Se propone hacer que el sistema sea fácilmente transportado en un ascensor convencional

3.3.2 Versión 2 del diseño conceptual

De acuerdo a las observaciones y la valoración del primer diseño, se procede a realizar un rediseño, el cual contempla las siguientes características:

- Se plantea segmentación de la estructura, siendo modular y fácilmente ensamblable.
- Se cambia concepción de jaula por una columna central que soporte los diferentes elementos.
- Con lo anterior se eliminan las restricciones para abducción y aducción de piernas.
- Se elimina la necesidad de utilizar rodachinas.
- Sistema compacto y fácilmente transportable.
- Los segmentos desacoplables se extienden hasta el máximo de las dimensiones de un ascensor convencional, disminuyéndose asimismo el número de módulos.

En la Figura 6 se presenta el modelo CAD, el cual presenta las siguientes características de diseño estructural:

- Estructura en tubería de acero de 50 x 30 mm.
- El tamaño de toda la estructura es menor al de la primera versión.
- Se emplean 4 segmentos en total.
- Columna central resistente con estructura tipo cercha.
- Permite abducción/aducción de piernas, con un rango articular máximo de 45°.
- Los segmentos móviles, de abducción y aducción, se desplazan sobre una base semicircular plana de 10 mm de espesor.
- Se utilizan ruedas y rodamientos para facilitar movimiento de abducción y aducción sobre la base semicircular.



Figura 6. Versión 2 del diseño conceptual de HYNMERS

Sobre esta segunda versión de HYNMERS se hacen recomendaciones en torno a mejorar el soporte frontal en donde se ubica la base semicircular y en extender la sección central de la estructura, con el fin de permitir su uso por parte de sujetos con mayor estatura.

3.3.3 Versión 3 del diseño conceptual 3 y posteriores

Con el fin de mejorar el soporte de la parte frontal de la estructura se posicionan las columnas en los extremos de la base semicircular, además, se extiende unos 10 cm la sección central, permitiendo ahora el uso por parte de pacientes con una estatura máxima de 1.95 m. En la Figura 7 se presenta el diseño conceptual de la versión 3 de HYNMERS.

La tercera versión del diseño conceptual de HYNMERS fue ampliamente aceptada por el grupo interdisciplinario, por lo cual se procedió a realizar una extensión del diseño, con la adición de un nuevo módulo para la compensación gravitacional de los brazos, como un análisis preliminar para su desarrollo en etapas futuras, en la cual se pueda incorporar con el entorno de realidad virtual y así propender por una mayor propiocepción del paciente cuando este se encuentre en terapias con HYNMERS. Esta adición fue conocida como la cuarta versión de HYNMERS y su diseño se presenta en la Figura 8, el módulo de los brazos se concibe además como una estructura aparte, el cual se presenta en la Figura 9.

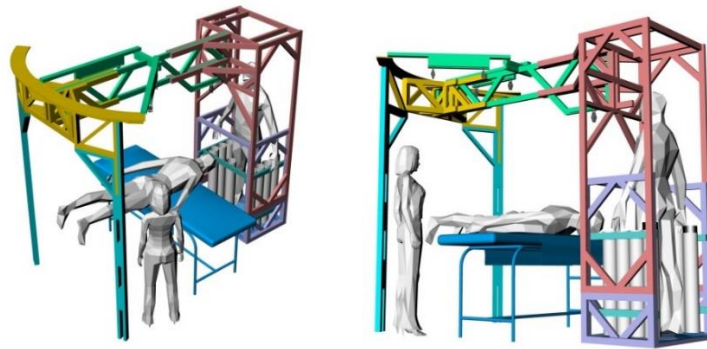


Figura 7. Versión 3 del diseño conceptual de HYNMERS

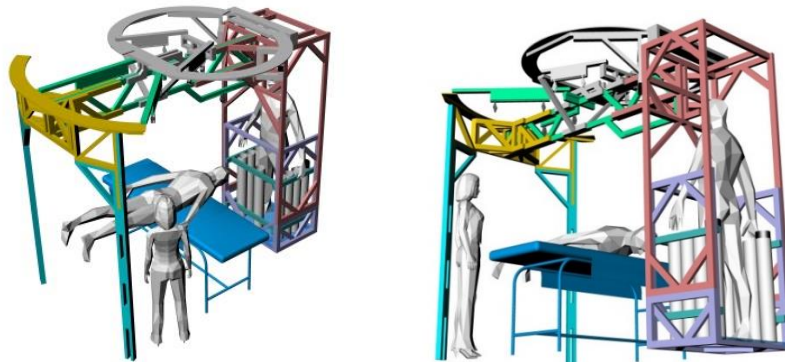


Figura 8. Versión 4 del diseño conceptual de HYNMERS

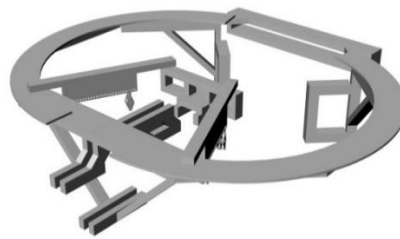


Figura 9. Módulo de brazos para la versión 4 del diseño de HYNMERS

En revisiones posteriores del diseño, emulando su ubicación en un espacio de fisioterapia, se detectó que la parte posterior de la estructura no es lo suficientemente práctica y cómoda para que el fisioterapeuta pueda configurar los contrapesos, requiriéndose además de un mayor espacio para que dicha persona pudiese ingresar. Es así como se replantea la sección posterior, en la versión 4 del diseño de HYNMERS, de tal forma que todos los tubos de contrapesos se ubican en una sola fila dentro de la estructura, permitiendo que el fisioterapeuta pueda ingresar desde el frente. Adicionalmente, se decide incorporar vigas de acero estructural más robustas en la sección frontal. La versión 5 del diseño de HYNMERS se presenta en la Figura 10.



Figura 10. Versión 5 del diseño conceptual de HYNMERS

Previo a la fabricación del prototipo se observó una alta complejidad de la estructura en su segmento frontal, en la pieza que conecta la base semicircular con la viga central (módulo amarillo). Se simplifica la estructura con vigas de 120 x 60 mm, su rediseño se observa en la sexta versión de HYNMERS, presentado en la Figura 11.



Figura 11. Versión 6 del diseño conceptual de HYNMERS

Como se puede observar en el nuevo diseño de la sección frontal, las vigas que sostienen la parte frontal de HYNMERS se conectan con la columna central mediante vigas de 50 x 30 mm, sin embargo, esta estructura se simplifica en la versión final del prototipo, es decir, en la séptima versión del diseño de HYNMERS, por dos vigas de 120 x 60 mm en forma de L, que se observa en la Figura 12.



Figura 1235. Versión 7 del diseño conceptual de HYNMERS

El diseño conceptual final presenta un diseño modular, contando con un total de 5 módulos, que son representados en diferentes colores, que se aprecia en la Figura 12. Específicamente, el segmento verde azul está constituido por dos vigas en forma de L que dan el soporte frontal a la estructura. El módulo verde es una estructura robusta en forma de T, que cumple la función de columna vertebral de la estructura, y que soporta el sistema de poleas y el sistema de abducción/aducción. Por su parte, el módulo azul, constituye la unión del módulo verde con la parte posterior, dándole firmeza y llevando en su interior el contrapeso destinado para compensar gravitacionalmente la cabeza. El módulo amarillo es una pieza en MDF en forma semicircular sobre la cual se apoya el sistema de abducción/aducción. Por último, el módulo rojo le da mayor estabilidad a la estructura y en este se localizan los demás contrapesos para las piernas y cuenta con el espacio suficiente para una futura versión avanzada del prototipo que, además de servir para rehabilitación de miembros inferiores, permita realizar ejercicios de rehabilitación de miembros superiores. El diseño modular y simple, facilita su construcción y ensamblaje, debido a que los módulos se acoplan a través de una serie de pernos en las caras adyacentes de las vigas, favoreciendo a su vez la robustez y estabilidad.

Con el diseño conceptual definitivo (séptima versión), se procede a realizar el diseño de detalle, teniendo en cuenta todos los elementos comerciales que se utilizarían para su fabricación, como tornillos, poleas y demás. Específicamente, se utilizan 3 tipos de tubería de acero estructural, de 30 x 50 mm para la mayor parte de la estructura, de 60 x 120 mm para la viga central y columnas frontales, y de 40 x 60 mm para los sistemas ajustables de las poleas. Para los brazos móviles, que permiten la abducción de las piernas, se utilizan bisagras de 3" y rodachinas con rodamientos de 3". En cuanto a las poleas, se escoge la marca Harken.

El diseño de detalle se desarrolló en corto tiempo debido a la fidelidad del diseño de concepto con el resultado final, de esta forma con pocas modificaciones se obtuvo el diseño definitivo con el cual se dio inicio al proceso constructivo. En la Figura 13 se presenta el diseño final de HYNMERS y en la Figura 14 el diseño técnico con cotas.

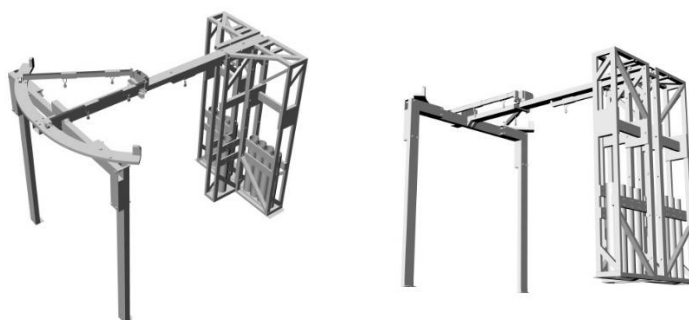


Figura 13. Diseño final de detalle de HYNMERS

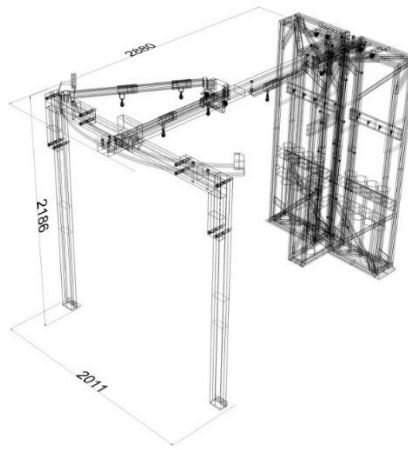


Figura 14. Vista tridimensional de cotas de HYNMERS (dimensiones en mm)

3.4 Fabricación e implementación de HYNMERS

Para la fabricación de HYNMERS se requirió un total de 13 vigas, de tres tipos diferentes, con las cuales se fabricaron 111 piezas necesarias para la construcción. Adicionalmente, en cumplimiento al diseño de detalle se utilizaron 3 tipos diferentes de poleas de igual tamaño, cuerdas Dyneema, sistemas de amarre para cabeza, muslos y pantorrilla, tubos de PVC y cadena eslabonada galvanizada para la elaboración de los contrapesos. Finalmente, en el proceso de ensamble se utilizaron vigas, ángulos, perfiles y/o platinas, material de pintura, material de corte y soldadura, y material de montaje, que incluye tornillería para el ensamble de la estructura, pernos de fijación, entre otros.

Para la implementación del sistema de contrapesos se optó por una solución de bajo costo, con base a eslabones de cadenas galvanizadas de 3/8". De esta forma, dependiendo del peso del paciente se configura el contrapeso con un conjunto de cadenas, cada una con un número específico de eslabones. HYNMERS está concebido para pacientes con un peso desde 40 kg, lo cual permite que se configure un peso fijo en el sistema. El número de cadenas se configura teniendo en cuenta el peso base y el peso de las extremidades del paciente. En la Tabla 2 se presentan las características de los eslabones fijos y en la Tabla 3 el conjunto de cadenas con el respectivo número de eslabones y peso para el proceso de configuración.

Tabla 2. Características de las cadenas para los pesos base (fijos)

Articulación	Eslabones fijos	Peso (kg)	Cantidad	Total eslabones	Peso total (kg)	Total (m)
Cadera	38	2,42	2	76	4,8	2,45
Rodilla	93	5,93	2	186	11,9	6,00

Tabla 3. Cadenas para configuración de contrapesos

Eslabones variables	Peso (kg)	Suma (kg)	Cantidad	Total eslabones	Peso total (kg)	Total (m)
1	0,06	0,06	4	4	0,25	0,13
2	0,13	0,19	4	8	0,51	0,26
4	0,25	0,45	4	16	1,02	0,52
8	0,51	0,96	4	32	2,04	1,03
16	1,02	1,98	4	64	4,08	2,06
32	2,04	4,01	4	128	8,15	4,13
77	4,91	8,92	2	154	9,81	4,97

En la Figura 15 se presenta el prototipo construido e instalado en su lugar de operación. En la Figura 16 se observa la parte posterior de la estructura con su sistema de contrapesos y en la Figura 17 se presenta el mecanismo de abducción/aducción con el sistema de poleas.



Figura 15. Prototipo mecánico para rehabilitación HYNMERS construido



Figura 16. Sistema de contrapesos en parte posterior de HYNMERS (tubos para cadenas)



Figura 1736. Mecanismo de abducción/aducción con sistema de poleas

3.5 Pruebas al sistema HYNMERS

Pruebas mecánicas iniciales, desde un punto de vista técnico, y sin personas, fueron desarrolladas en el sistema HYNMERS, con el fin de evaluar el prototipo pasivo desde diferentes aspectos, principalmente en torno al rango de movimiento y a las fuerzas ejercidas por el sistema de poleas, que permitan determinar su usabilidad en personas, y eventualmente en pacientes, en los cuales se pretende incluir también víctimas de amputaciones transtibiales. Con el objetivo de medir el rango de movilidad angular de los sistemas abducción/aducción de cadera, se tomó con un goniómetro el rango mínimo y máximo de movilidad, los cuales son reportados en la Tabla 4 y en los cuales se puede observar su concordancia con los 45° de movilidad estipulados en el diseño.

Tabla 4. Movilidad máxima y mínima de los brazos de abducción de piernas

Segmento	Posición mínima (°)	Posición máxima (°)
Pierna derecha	0,0	45,0
Pierna izquierda	1,0	45,0

Adicionalmente, se midió el rango de movilidad del sistema de contrapesos, por ejemplo, el desplazamiento total de los tubos posteriores que contienen las cadenas. Los resultados son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Movilidad máxima de contrapesos para los segmentos de la pierna derecha

Segmento	Movilidad máxima pierna derecha (m)	Movilidad máxima pierna izquierda (m)
Muslo	0,143	0,142
Pantorrilla	0,173	0,172

El desplazamiento total del contrapeso de la pantorrilla es mayor debido a que el tubo de PVC que contiene el contrapeso es más corto. Ambos desplazamientos se encuentran dentro de los rangos previstos por el diseño y permiten el movimiento correcto de la pierna del paciente. Además, los ejercicios guiados por el sistema de realidad virtual de HYNMERS contemplan movimientos suaves y cortos, por lo cual no sería empleado todo este rango.

Para determinar la fuerza ejercida por el sistema se hace uso del arreglo de poleas y contrapesos, y a través de un dinamómetro análogo, con un rango de medida de 15 kg, se procede a realizar dos pruebas básicas en los segmentos de muslo y pantorrilla de la pierna derecha.

La primera prueba consiste en agregar el peso máximo estipulado para cada segmento en los tubos de PVC, que funcionan como sistemas contenedores del contrapeso en la parte posterior del prototipo, para luego proceder a levantarlo manualmente en el extremo donde iría sujetado el paciente. La segunda prueba consiste en agregar el mismo peso (peso máximo), en tubos de PVC provisionales ubicados en el extremo de sujeción del paciente, y que emulan el peso de la pierna de una persona, y proceder a mover estos hacia arriba y hacia abajo, tal como se efectuaría

en una terapia de rehabilitación, tomándose durante esta prueba la fuerza máxima requerida. Ambas pruebas son realizadas con una configuración de muslo en 0,20 m y pantorrilla en 0,61 m y en 45° de abducción.

En la Tabla 6 se presentan los resultados para el muslo con un peso de 10.84 kg, cabe aclarar que el peso máximo para este segmento es de 14.41 kg, sin embargo, por el rango de lectura del dinamómetro, de 15 kg, no fue efectuada la prueba con este peso. En la Tabla 7 se presentan los resultados para el segmento de la pantorrilla con su máximo peso de 6.24 kg.

Tabla 6. Resultados de prueba para segmento de muslo con contrapeso de 10.84 kg

Prueba	Fuerza (kg)
Fuerza requerida para levantar contrapeso (Prueba 1)	12.5
Fuerza requerida para levantar contrapeso con compensación (Prueba 2)	1.8
Fuerza requerida para bajar contrapeso con compensación (Prueba 2)	2.3

Tabla 7. Resultados de prueba para segmento de pantorrilla con contrapeso de 6.24 kg

Prueba	Fuerza (kg)
Fuerza requerida para levantar contrapeso (Prueba 1)	6.4
Fuerza requerida para levantar contrapeso con compensación (Prueba 2)	0.2
Fuerza requerida para bajar contrapeso con compensación (Prueba 2)	0.3

Se observa que para ambos segmentos la fuerza requerida para levantar el contrapeso sin compensación es mayor al peso agregado al sistema, esto se debe principalmente por el peso adicional del tubo de PVC y la fricción presentada en el mecanismo. Adicionalmente, se esperaría que la fuerza requerida fuese cercana a cero para las pruebas con compensación, sin embargo, como pudo observarse existe una pequeña fricción intrínseca en el mecanismo que produce lecturas entre 1.8 kg y 2.3 kg para el muslo, y entre 0.2 kg y 0.3 kg para la pantorrilla, fuerza que es requerida para iniciar el movimiento de cada segmento corporal de la pierna.

4. CONCLUSIONES

En este capítulo se presenta el proceso de diseño del sistema mecánico pasivo para rehabilitación, llamado HYNMERS, el cual provee una auto-cancelación pasiva de la gravedad a los miembros inferiores del usuario. Este fue desarrollado con base a una lista de requerimientos, predefinido por un grupo interdisciplinar, y respondiendo satisfactoriamente a las necesidades encontradas dentro del contexto de la terapia acuática y de los ejercicios de rehabilitación basados en esta. El proceso estuvo enmarcado por un constante ajuste del diseño conceptual, de tal forma que se supliesen las diferentes condiciones previstas para HYNMERS, y que a su vez permitiese una fácil usabilidad.

El diseño final de HYNMERS incorpora un sistema de poleas en una estructura simple y de baja complejidad para fabricar y ensamblar, con base a elementos comerciales y de fácil adquisición. Entre las principales características del prototipo se encuentra su diseño compacto y modular, el cual es adaptable y funcional para personas de diferentes rangos de estatura y peso, permitiendo movimientos de flexo/extensión y abducción/aducción de piernas.

Resultados obtenidos en pruebas iniciales sobre el sistema, permitieron determinar que este se encuentra en condiciones aceptables de operación para su fase inicial de ensayos con modelos anatómicos articulados, para luego proceder a pruebas con personas y eventualmente con pacientes. En cuanto al funcionamiento de sus principales componentes, todos se encuentran dentro de los rangos previstos del diseño funcional. Sin embargo, fue hallada una leve fricción en el mecanismo de poleas que puede afectar la sensación de ingravidez que pretende proveer HYNMERS, y el cual debe ser verificado, en trabajos futuros, a través de pruebas adicionales.

REFERENCIAS

- [1] K. Dziedzic, J. L. Jordan, and N. E. Foster, "Land- and water-based exercise therapies for musculoskeletal conditions," *Best Practice & Research: Clinical Rheumatology*, vol. 22, no. 3, pp. 407–418, jun 2008. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1521694207001143> [Accessed Jan. 21, 2019].
- [2] B. E. Becker, "Aquatic Therapy: Scientific Foundations and Clinical Rehabilitation Applications," *PM and R*, vol. 1, no. 9, pp. 859–872, 2009. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1934148209005516> [Accessed Jan. 29, 2019].
- [3] S. I. Batterham, S. Heywood, and J. L. Keating, "Systematic review and meta-analysis comparing land and aquatic exercise for people with hip or knee arthritis on function, mobility and other health outcomes," *BMC Musculoskeletal Disorders*, vol. 12, no. 1, p. 123, dec 2011. [Online]. Available: <http://bmcmusculoskeletdisord.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2474-12-123>. [Accessed Jan. 23, 2019].
- [4] A. Severin, B. J. Burkett, M. McKean, and M. Sayers, "Biomechanical aspects of aquatic therapy: A literature review on application and methodological challenges." *Journal of Fitness Research*, vol. 5, no. 1, pp. 48–62, 2016.
- [5] Australian Physiotherapy Association, "Australian guidelines for aquatic physiotherapists working in and/or managing hydrotherapy pools" 2015. [Online]. Available: <http://www.physiotherapy.asn.au/DocumentsFolder/APAWCM/TheAPA/NationalGroups/AquaticPhysiot> [Accessed Feb. 21, 2019].

- [6] Q. Lu, C. Ortega, and O. Ma, "Passive Gravity Compensation Mechanisms: Technologies and Applications," *Recent Patents on Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 32–44, 2012.
- [7] G. Endo, H. Yamada, A. Yajima, M. Ogata, and S. Hirose, "A passive weight compensation mechanism with a non-circular pulley and a spring," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 3843–3848.
- [8] T. Nakayama, Y. Araki, and H. Fujimoto, "A new gravity compensation mechanism for lower limb rehabilitation," in *2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2009*, 2009, pp. 943–948.
- [9] D. Choi, J. Choi, C. Cho, S. Park, and S. Kang, "A safe robot arm with safe joints and gravity compensator," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 362–368, 2013.
- [10] S. Banala, S. Agrawal, A. Fattah, K. Rudolph, and J. Scholz, "A gravity balancing leg orthosis for robotic rehabilitation," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, pp. 2474–2479 Vol.3.
- [11] S. J. Ball, I. E. Brown, and S. H. Scott, "MEDARM: A rehabilitation robot with 5DOF at the shoulder complex," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2007, pp. 1–6.
- [12] S. J. Ball, I. E. Brown, and S. H. Scott, "A planar 3DOF robotic exoskeleton for rehabilitation and assessment," in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings*. IEEE, aug 2007, pp. 4024–4027.
- [13] C. Gosselin, "Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives," *Mechanical Engineering Reviews*, vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2013. [Online]. Available: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/mer/1/1/12014dsm0004/article-char/ja/> [Accessed Feb.14, 2019].
- [14] A. H. Stienen, E. E. Hekman, F. C. Van Der Helm, G. B. Prange, M. J. Jannink, A. M. Aalsma, and H. D. Van Kooij, "Freebal: Dedicated gravity compensation for the upper extremities," in *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, ICORR'07*. IEEE, jun 2007, pp. 804–808.
- [15] A. Alamdari and V. Krovi, "Design and Analysis of a Cable-Driven Articulated Rehabilitation System for Gait Training," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 8, no. 5, p. 051018, 2016.
- [16] N. Ulrich and V. Kumar, "Passive mechanical gravity compensation for robot manipulators," in *1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991, pp. 1536–1541.
- [17] H. B. Brown and J. M. Dolan, "A Novel Gravity Compensation System for Space Robots," in *Conference on Robotics for Challenging Environments*, 1994, pp. 1–9.
- [18] Y. Sato, A. Ejiri, Y. Iida, S. Kanda, T. Maruyama, T. Uchiyama, and H. Fujii, "Micro-G emulation system using constant-tension suspension for a space manipulator," in *1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991, pp. 1893–1900.
- [19] A. Fischer and S. Pellegrino, "Interaction Between Gravity Compensation Suspension System and Deployable Structure," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 37, no. 1, pp. 93–99, jan 2008. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/2.3531> [Accessed Jan. 29, 2019].
- [20] D. E. Hewes, "Reduced-Gravity Simulators for Studies of Man's Mobility in Space and on the Moon," *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 11, no. 5, pp. 419–431, oct 1969. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001872086901100502> [Accessed Feb. 21, 2019].
- [21] G. Greschik and W. K. Belvin, "The Ultimate in Passive Gravity Compensation for Vibration Testing and Some More," in *46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, apr 2012, pp. 1–19.
- [22] D. Jain, M. Sra, J. Guo, R. Marques, R. Wu, J. Chiu, and C. Schmandt, "Immersive Scuba Diving Simulator Using Virtual Reality," in *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 2016, pp. 729–739.
- [23] J. G. Patino, E. E. Bravo, J. J. Pérez, and V. Pérez, "Lower limb rehabilitation system controlled by robotics, electromyography surface and functional electrical stimulation," in *Pan American Health Care Exchanges, PAHCE*, 2013.
- [24] S. Bustamante, J. C. Yepes, V. Z. Pérez, J. C. Correa, and M. J. Betancur, "Online simulation of mechatronic neural interface systems: Two case-studies," in *Communications in Computer and Information Science*, 2017, vol. 690, pp. 255–275.

Tendencias investigativas en ingeniería mecatrónica: Un análisis bibliométrico

Hernán González A.¹

Daniel F. Peñarete M.²

Hugo F. Lobatón G.³

¹ Universidad Autónoma de Bucaramanga

^{2,3} Universitaria Agustiniana Uniagustiniana
Colombia

En este trabajo se presenta una recopilación de 50 trabajos científicos sobre el estado del arte en ingeniería mecatrónica. Esta compilación se realizó utilizando la base de datos bibliográficos Scopus y fue limitada a los trabajos publicados en revistas científicas durante los últimos 5 años. La metodología de exploración se fundamenta en las palabras claves utilizadas en los criterios de búsqueda, las cuales están relacionadas con las diferentes áreas de aplicación de la ingeniería mecatrónica. Además de esto se realiza un análisis de coocurrencia de las palabras claves con el fin de encontrar un punto de convergencia con los análisis bibliométricos descritos. Finalmente, de acuerdo con los resultados encontrados se proponen tendencias generales y específicas en industria 4.0 en el área de la ingeniería mecatrónica.

1. INTRODUCCIÓN

Desde su aparición en Japón, la mecatrónica, nombre con el que se bautizó la aplicación de encender y apagar un motor desde el computador, ha sido un área de desarrollo tecnológico que evolucionó y se formalizó a través del tiempo. El Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) la define como *la integración sinérgica de ingeniería mecánica con electrónica y control computacional inteligente en el diseño y manufactura de productos y procesos*. Por su parte, el Development Advisory Committee of the European Union (IRDAC) acoge la definición de mecatrónica para la Unión Europea como *la combinación sinérgica de ingeniería de precisión, control electrónico y sistemas, pensando en el diseño de productos y procesos de manufactura. Esta es un área interdisciplinaria que se basa en las disciplinas que la conforman e incluye temas que normalmente no son asociados con uno de los ya mencionados* [1]. Estas definiciones son representadas en la Figura 1, propuesta por Craig [2], donde se establecen las 4 áreas principales de la ingeniería mecatrónica: mecánica, electrónica, computación y control.

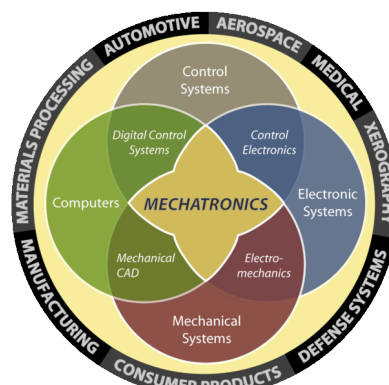


Figura 1. Diagrama representativo de ingeniería mecatrónica [2]

En este documento se realiza la revisión del estado del arte en ingeniería mecatrónica teniendo en cuenta las aplicaciones relacionadas con las cuatro áreas definidas anteriormente, las cuales pueden desarrollarse en disciplinas como la medicina, la construcción, el sector petróleo y gas, la educación, la robótica, los sistemas autónomos, la automatización industrial y la manufactura, entre otras. La presente revisión tendrá dos objetivos principales: primero, conocer los temas de investigación que más se están trabajando actualmente en torno a la mecatrónica; y segundo, determinar cuáles son las más probables tendencias esta disciplina. La revisión se realizará utilizando la base de datos bibliográficos Scopus a través de una metodología de búsqueda específica.

2. MÉTODO

2.1 Búsqueda inicial

La búsqueda de los artículos fue realizada basándose en un primer vistazo sobre las tendencias de investigación usando los temas fundamentales de la conferencia IEEE en ingeniería mecatrónica llamada International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) y son los siguientes:

¹ hgonzalez3@unab.edu.co

² daniel.penarete@uniagustiniana.edu.co

³ hugo.lobaton@uniagustiniana.edu.co

- Intelligent mechatronics, robotics, biomimetics, automation and control systems
- Industrial automation, process control, manufacturing process and automation
- Biomedical and rehabilitation engineering, prosthetics and artificial organs
- Teleoperation, telerobotics, haptics, and teleoperated semi-autonomous systems
- Sensor design, multi-sensor data fusion algorithms and wireless sensor networks
- Control system modeling and simulation techniques and methodologies
- AI, intelligent control, neuro-control, fuzzy control and their applications
- Opto-electronic elements and Materials, laser technology and laser processing
- Elements, structures, mechanisms, and applications of micro and nano systems

Dado que el interés de este trabajo se centra en la aplicación y no en el concepto, se definieron estas palabras clave:

- Mechatronics
- Mechatronic robotics
- Healthcare robotics
- Agricultural robots
- Industrial automation
- Real time systems automation
- Automotive manufacture
- Learning in robots
- Autonomous car
- Nanotechnology robotics
- Artificial intelligence robots
- Nanotechnology smart sensors
- Education mechatronics

2.2 Límite de tiempo en artículos de investigación.

Cada una de las ecuaciones de búsqueda es presentada en el documento. La ventana de tiempo utilizada en la búsqueda de artículos abarca el periodo 2013-2018.

2.3 Análisis de Coocurrencia

Las redes bibliométricas están definidas por nodos y bordes, donde los nodos, generalmente, representan publicaciones, revistas, autores o palabras (clave, temas, área disciplinares) y los bordes relaciones de citación (co citación, acoplamiento bibliográfico o citación directa), coocurrencia de palabras o coautoría. Además, los nodos también representan la fuerza de dicha relación [3], [4]. Las redes basadas en la coocurrencia de palabras toman palabras del resumen, el título o del conjunto de palabras clave (del autor o de la revista). La coocurrencia de un par de palabras es el número de publicaciones en que ese par de palabras se repite [3], [4].

2.4 Presentación de resultados

Los artículos serán organizados de manera descendente por número de citas recibidas, seleccionando los primeros 50 documentos arrojados por la búsqueda. También se organizarán en grandes temas que enmarquen la generalidad de cada artículo.

3. RESULTADOS

En la fase de búsqueda de la información se detectó que algunas palabras clave no arrojan resultados significativos cuando se relacionan directamente con la palabra mecatrónica. Por tal razón, muchas de las palabras clave están acompañadas por la palabra robótica y no por la palabra mecatrónica. Por ejemplo, al realizar una búsqueda con las palabras clave *inteligencia artificial en mecatrónica*, se encontraron 19 artículos al usar la siguiente cadena:

title-abs-key (artificial and intelligence and mechatronics) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)) and (limit-to (doctype, "ar")).

En contraste, si en la ecuación de búsqueda se sustituye la palabra *mecatrónica* por *robótica*, el resultado de la búsqueda arroja un total de 1.003 artículos.

title-abs-key (artificial and intelligence and robots) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)) and (limit-to (doctype, "ar")).

Entre los nombres de las revistas consultadas se encuentran prestigiosas revistas de cuartil 1, tales como:

- Nature Communications
- Robotics and Autonomous Systems
- Mechatronics
- iee/asm Transactions on Mechatronics
- International Journal of Robotics Research
- iee Transactions on Haptics
- Journal of Field Robotics
- Automation in Construction
- Soft Robotics

3.1 Palabra clave *mechatronics*

Title-abs-key (mechatronics) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

Los artículos arrojados por la búsqueda tras aplicar la ecuación anterior son:

- *Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers* (citado en 147 documentos). En este artículo se propone el uso de impresoras 3D de código abierto como una herramienta que permite el ahorro de dinero en los hogares. La masificación de estas herramientas ha permitido la reducción de su precio, haciéndolas asequibles. Además, estas son capaces de producir sus propias piezas para reparación. Se propone su uso para fabricar productos que sean necesarios en el hogar. Este estudio, realizado en Estados Unidos, calcula que el tiempo de retorno de una impresora 3D puede variar de 4 meses a 2 años y el retorno a la inversión entre 40 y 200 %. Esta investigación fue realizada con más de 200 productos que normalmente son adquiridos en el hogar. En Colombia, esta propuesta podría ser estudiada y tener gran potencial de aplicación para suplir productos esenciales en las poblaciones más vulnerables o de baja capacidad económica, generando así un impacto social positivo [5].
- *Mechatronic systems design for an autonomous robotic system for high-efficiency bridge deck inspection and evaluation* (citado en 50 documentos). Este trabajo presenta el desarrollo de un robot para la inspección de puentes, utilizando técnicas de evaluación no destructivas (NDE) para establecer sus condiciones estructurales. Dentro de la metodología seguida para el diseño del robot, se determinan las principales técnicas NDE usadas en robótica. Para efectos de detectar la localización del robot, se implementa un sistema de posicionamiento basado en técnicas de fusión sensorial usando filtro de Kalman. La implementación redundante de varios tipos de sensores como GPS, *encoders* y sistemas de medida inercial (IMU) es usada para evitar la pérdida de localización del robot debido a caídas de la señal a causa de interferencias climáticas o por la estructura del puente. Finalmente, se establece la planificación y el seguimiento de las trayectorias establecidas para realizar una tarea programada [6].
- *Control strategies for patient-assisted training using the ankle rehabilitation robot (ARBOT)* (citado en 43 documentos). En este trabajo se presenta la metodología de diseño para el desarrollo de un robot paralelo utilizado en la rehabilitación de tobillos. Su principal aporte es proponer una arquitectura de control que permite hacer una rehabilitación asistida a los pacientes. En esta plataforma, la persona responsable de la fisioterapia se encarga de programar o diseñar los movimientos que deben ser ejecutados y transferirlos al robot. El uso de este tipo de herramientas permite caracterizar la efectividad de los ejercicios propuestos para la rehabilitación de esta parte del cuerpo, haciendo que estos no dependan de la experticia del fisioterapeuta asignado al proceso de rehabilitación [7].
- *Design and actuator selection of a lower extremity exoskeleton* (citado en 36 documentos). El desarrollo de exoesqueletos para brindar ayuda a personas en condición de discapacidad no es un tema nuevo de investigación, sin embargo, es un asunto abierto al desarrollo de nuevas técnicas que permitan mejorar su desempeño. En este trabajo se presenta el desarrollo de un exoesqueleto para extremidades inferiores, donde su principal aporte consiste en el diseño antropomórfico desarrollado para ayudar a pacientes en actividades como caminar, sentarse y levantarse, las cuales realizan normalmente con sus extremidades inferiores. Esta investigación propone un sistema de control adaptativo *fuzzy* basado en redes neuronales, lo cual le permite ser robusto ante diferentes comportamientos no lineales del sistema [8].
- *The Internet of Things – The future or the end of mechatronics* (citado en 36 documentos). El internet de las cosas (IoT) es un área de creciente interés, donde los conceptos de integración, transferencia de información y funcionalidad son similares a los de mecatrónica. Este documento establece una relación entre IoT e ingeniería mecatrónica en perspectiva y considera los retos que enfrentan los diseñadores e implementadores de dispositivos y maquinas inteligentes. El trabajo hace una descripción del impacto del internet de las cosas,

abordando los retos y el rol de la ingeniería mecatrónica en el diseño de sistemas, así como la complejidad de esta área. Además, el estudio presenta los retos de la mecatrónica en temas como el diseño de sistemas y su complejidad, la tecnología, la interacción con el usuario, los sistemas ciberfísicos, la seguridad, la educación y la industria [9].

3.2 Palabra clave *mechatronics robots*

Title-abs-key (mechatronic and robots) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)) and (limit-to (doctype, "ar"))).

Los artículos arrojados por la búsqueda tras aplicar la ecuación anterior son:

- *Valkyrie: NASA's first bipedal humanoid robot* (citado en 77 documentos). Este artículo describe el proceso de diseño, construcción y puesta en funcionamiento del robot bípedo Valkyrie. Este proyecto ejecutado por la NASA busca brindar soluciones alternativas para usurpar la posición del ser humano en procesos altamente peligrosos como el incidente nuclear de Fukushima (Japón), el cual fue catalogado como el segundo más importante en cuanto a emisiones de radiación después de Chernóbil. Valkyrie está conformado de actuadores elásticos y posee 44 grados de libertad. Este trabajo detalla cada subsistema mecatrónico y el desarrollo de su algoritmo de control basado en la cinemática inversa. Valkyrie se convierte en el primer robot humanoide diseñado para sustituir labores del accionar humano, posibilitando la exploración espacial hacia otros planetas sin poner riesgo humano [10].
- *Design and development of 3D printed myoelectric robotic exoskeleton for hand rehabilitation* (citado en 48 documentos). Este artículo desarrolla una herramienta robótica de exoesqueleto portable para rehabilitar la movilidad de los dedos en pacientes que han sufrido un accidente cerebro vascular. Su mecanismo está diseñado para favorecer el movimiento de cada uno de los dedos y reproducir el ejercicio de rehabilitación, por medio de cables que realizan la extensión de los dedos y un resorte encargado de realizar la flexión. El paciente es el encargado de realizar los movimientos desde electrodos ubicados en la mano sana, de esta forma los movimientos son copiados y posteriormente replicados en la mano del lado hemipléjico. En este se presenta el diseño del exoesqueleto e impresión 3D, el cual posee como actuadores 5 servomotores y 3 grados de libertad por dedo. Además, el exoesqueleto es evaluado a través de diferentes rutinas de adaptación por parte del paciente [11].

3.3 Palabra clave *healthcare robotics*

Title-abs-key (healthcare and robotics) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *Soft robotics: A perspective - Current trends and prospects for the future* (citado en 331 documentos). Este trabajo presenta el estado del arte y las tendencias en torno a *soft robots* (robots blandos), los cuales son robots fácilmente deformables compuestos de materiales como fluidos, gel, elastómeros y materiales reológicos. Este tipo de robot debe ser capaz de adaptar su estructura o forma y su locomoción según la tarea a realizar, los obstáculos o cualquier condición del entorno. Esta área en desarrollo se fundamenta en principios biológicos; sin embargo, es altamente interdisciplinaria. Sus principales aplicaciones se encuentran en el cuidado de la salud, la asistencia humana cooperativa y la exploración del campo [12].
- *Designing robots for care: care centered* (citado en 74 documentos). En este trabajo se presenta un estudio teórico enfocado en sustentar por qué los robots, además de cumplir con normas técnicas, deben cumplir normas éticas para no vulnerar el derecho de cada paciente a recibir un buen trato durante el cuidado de su enfermedad. Inicialmente, se define qué es un robot para cuidado y por qué se sugiere una reformulación de su diseño para incorporar dichas normas. Seguido, se exploran los conceptos de valor y cuidado, con el fin de establecer un marco de referencia a partir del cuidado de pacientes. También propone una metodología de diseño con base en el cuidado que agrega la sensibilidad que complementa normas ya establecidas para robots personales (establecidas por instituciones como la ISO), lo cual permite superar las principales falencias de los sistemas tradicionales [13].

3.4 Palabra clave *agricultural robots*

title-abs-key (agricultural and robots) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *New trends in robotics for agriculture: integration and assessment of a real fleet of robots* (citado en 33 documentos). Este artículo presenta el diseño y la implementación de un robot autónomo para agricultura y como se lleva a cabo su integración para trabajar de forma coordinada en una flota de vehículos. El estudio hace una comparación entre las especificaciones de un vehículo autónomo y un vehículo autónomo para cultivos. Además, establece la estructura del sistema autónomo, el cual se divide en 3 partes principales: el vehículo, los dispositivos y el control.

Así mismo, este trabajo establece una arquitectura que reúne los requerimientos para integrar una flota de vehículos autónomos con el fin de facilitar el trabajo en cultivos. Finalmente, se presenta la implementación mediante el análisis dos tipos de enfoque para el control (control centralizado y control descentralizado) aplicados a una flota de 3 tractores comerciales para agricultura [14].

- *Agricultural robots for field operations: concepts and components* (citado en 59 documentos). Este trabajo presenta diferentes conceptos necesarios para el diseño y la estructuración de un robot para agricultura. Se fundamentan las principales motivaciones que conducen a su diseño y desarrollo, las condiciones de operación de este equipo y sus principales limitaciones. Además, se definen conceptos como la interacción humano-robot, la cual permite al robot complementarse con habilidades humanas como la toma de decisiones, y los robots totalmente autónomos, que no requieren de intervención humana. Igualmente, se definen las principales capacidades del robot, a saber: habilidades requeridas, movilidad y guía, detección y auto-localización, planificación de trayectorias y manipuladores y herramientas [15].
- *Deepfruits: a fruit detection system using deep neural networks* (citado en 81 documentos). En este trabajo se propone un nuevo procedimiento para realizar detección de frutas por medio del aprendizaje profundo basado en el algoritmo *Faster Region-based CNN* (FRCNN). En esta nueva metodología se utilizan imágenes obtenidas a partir de dos modalidades: una fuente a color (RGB) y una fuente *Near-infrared* (NIR). Esta información multimodal es combinada con los métodos de fusión tardía (*late fusion*) y fusión temprana (*early fusion*). En este procedimiento se incrementa los resultados de precisión y *recall* en la clasificación del pimentón. Finalmente, se presenta la implementación del mismo método para entrenar la red con 6 frutas adicionales: mango, aguacate, manzana, naranja, fresa y melón [16].
- *3-D imaging systems for agricultural applications – A review* (citado en 43 documentos). En este trabajo se realiza una revisión que sustenta el uso de cámaras como un tipo de sensor multifuncional y económico en la agricultura. Inicialmente, se presenta la definición de las técnicas de visión en 3D según los principios básicos de medida de la profundidad. Dentro de cada uno de los principios básicos se desprenden diferentes técnicas de aplicación, dando a conocer sus ventajas y desventajas. Seguidamente, se da cuenta de la aplicación de estas técnicas en áreas como la navegación de vehículos, donde se determina su posicionamiento y la ejecución de trayectorias; el cuidado de cultivos, a través de la ejecución de tareas repetitivas que demandan tiempo; y la cría de animales mediante la implementación de robots para la alimentación y limpieza de estos. En cada una de estas aplicaciones se describen las dificultades técnicas que podrían surgir en su implementación [17].

3.5 Palabra industrial automation

Title-abs-key (industrial and automation) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0* (citado en 198 documentos). Este artículo presenta las posibles tendencias en las comunicaciones industriales con el surgimiento de otras áreas como los sistemas ciberfísicos (CPS) y el internet de las cosas (IoT). Este trabajo analiza de qué forma estas tecnologías emergentes cambiarán las aplicaciones en la automatización industrial, desde una perspectiva de la Industria 4.0. Una de las principales tendencias identificadas es la utilización de sistemas ethernet como red principal de control, la cual podría avanzar hacia una red de ethernet para control en tiempo real. Desde este punto se formulan varias preguntas sobre el futuro del desarrollo de redes 5G, considerando que las antiguas estructuras de redes 4G podrían fortalecerse o simplemente desaparecer a causa del surgimiento de esta nueva tecnología [18].
- *Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: prototype implementations and challenges* (citado en 145 documentos). Este trabajo presenta diferentes ejemplos de un proceso de automatización industrial basado en el concepto de sistemas ciberfísicos (CPS). Se introducen las principales características de estos sistemas y algunos ejemplos de su implementación a nivel industrial que apoyan el paradigma de automatización colaborativa basado en el uso de sistemas multi-agentes (MAS) y arquitecturas de orientadas al servicio. Se presentan 4 proyectos de innovación que abarcan temas como: infraestructura de capa cruzada orientada al servicio para dispositivos embebidos distribuidos; integración de procesos y control de calidad usando tecnologías multi-agentes; administración de producción adaptativa; y arquitectura para procesos orientados a servicios, monitoreo y control [19].
- *Towards Industry 4.0 – Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems* (citado en 117 documentos). En este artículo se plantea la Industria 4.0 como una inclusión del internet de las cosas en el sector de la automatización industrial, destacando la importancia de esta nueva herramienta; aun cuando en la actualidad no goce de gran popularidad debido a que es un recurso sectorizado a propietarios, más no de carácter general. Como solución, “*Smart Factory*” implementó el primer sistema modular de múltiples

proveedores como referente para la industria 4.0, con el fin de convertirlo en un estándar mundial. Como resultado, se presentan diferentes proyectos para futuras investigaciones en líneas de producción altamente modulares basados en esta tecnología [20].

- *An integrated design framework of fault-tolerant wireless networked control systems for industrial automatic control applications* (citado en 116 documentos). Este artículo presenta una metodología para el diseño de una red de control inalámbrica tolerante a fallos de automatización industrial. Esta metodología permite realizar un diseño integral de los protocolos de control de acceso al medio (MAC) y el control de procesos y esquemas de identificación de fallos (FDI). Así mismo, esta metodología posee características que posibilitan una transmisión determinística por medio de redes inalámbricas, una reducción en la cantidad de información y una agrupación de todos los requerimientos del control y el rendimiento del esquema de identificación de fallos. Finalmente, la plataforma diseñada es probada en el control de diferentes sistemas, por ejemplo, el control de un péndulo invertido y el control de nivel de tres tanques interconectados [21].
- *Augmented reality in built environment: classification and implications for future research* (citado en 77 documentos). En este artículo se presenta una revisión del estado del arte en realidad aumentada (AR) que abarca los principales estudios realizados en esta área. El trabajo presenta diferentes herramientas disponibles, con su respectiva descripción, para realizar desarrollos e investigaciones en AR. El estudio evaluó diferentes artículos con el fin de determinar qué temas han sido explorados en AR, cuáles son los desarrollos y los problemas fundamentales en esta área y cuáles son las futuras tendencias en el campo. Adicionalmente, se presenta una clasificación de diversos artículos según las 4 capas taxonómicas de AR que son: conceptos y teoría, implementación, evaluación e implementación industrial. En cada una de estas secciones se presentan trabajos realizados, clasificando alrededor de 120 artículos. Finalmente, se presenta una discusión sobre las posibles aplicaciones y tendencias en esta área [22].
- *Engineering methods and tools for cyber-physical automation systems* (citado en 20 documentos). Este trabajo presenta una metodología para configurar y soportar los sistemas de automatización y manufactura de manera efectiva a lo largo de su ciclo de vida. Así mismo, presenta una propuesta para que el modelado de aplicación, la visualización y reutilización de dichos sistemas puedan hacer su transición a los sistemas ciberfísicos. Con este fin, los autores revisan diferentes métodos de ingeniería propuestos y algunos ejemplos adoptados. Finalmente, se presentan los resultados de un estudio de caso sobre el tema [23].

3.6 Palabra clave *Real time systems automation*

(title-abs-key (real and time and systems) and title-abs-key (automation)) and (limit-to (srctype, "j")) and (limit-to (doctype, "ar")) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes* (citado en 308 documentos). En este artículo presenta la implementación de un prototipo para el monitoreo en tiempo real de variables físicas en el hogar. Este sistema permite cuantificar variables físicas tales como temperatura del agua, voltaje, corriente, humedad, temperatura del aire, intensidad lumínica, entre otras, posibilitando el diagnóstico y control del consumo en el hogar. Además, el sistema hace posible realizar operación de manejo remoto de elementos como lámparas, calentadores e intensidad lumínica, al igual que reprogramar tareas cuando el usuario lo requiera. El sistema transmite los datos vía inalámbrica usando ZigBee hacia un computador que realiza el control centralizado bajo el IOS Linux. Los datos adquiridos son almacenados en la nube del sistema utilizando scripts, garantizando el acceso desde cualquier punto con acceso a internet [24].
- *Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3Dphoto-reconstruction methods* (citado en 195 documentos). Este artículo desarrolla una herramienta para la reconstrucción de parámetros biofísicos como la altura de árboles con diferentes medidas. Este cálculo se realiza por medio de sensores pasivos como cámaras que son embarcadas en un vehículo aéreo no tripulado (UAV), el cual está dotado con una cámara RGB de bajo costo modificada para detección infrarroja por color (CIR) y sincronizada con una unidad de GPS. A través de las imágenes adquiridas se evalúan los efectos de resolución espacial, con el objetivo de generar modelos de superficie digital usando métodos de reconstrucción en 3D. Esta investigación fue llevada a cabo en 2 huertos a un costo mucho más bajo que sistemas con sensores de alta precisión, como LIDAR, arrojando un margen de error cercano a 10 % [25].

3.7 Palabras clave *teleoperation haptics*

(Title-abs-key (teleoperation) and title-abs-key (haptics)) and (limit-to (srctype, "j")) and (limit-to (doctype, "ar")) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *RML glove-an exoskeleton glove mechanism with haptics feedback* (citado en 58 documentos). Este trabajo presenta el diseño y la construcción de un mecanismo de guante háptico conformado por un sistema mecatrónico ligero, portátil y autónomo, que es adaptable a la mano y proporciona realimentación de la fuerza al tacto de cada dedo sin restringir o afectar la libertad de movimiento. Para su diseño se consideraron las siguientes características: tamaño y peso del guante, se prefiere que sea lo más pequeño y liviano posible para facilitar su uso; y la flexibilidad del mecanismo, buscando brindar buena maniobrabilidad y el rango dinámico adecuado para favorecer la sensibilidad. Este sistema es validado mediante el comando de un robot móvil operado remotamente con fuerza como entrada y posición como salida, aumentando la tele-presencia con dispositivos tele operados [26].
- *Improving transparency in teleoperation by means of cutaneous tactile force feedback* (citado en 46 documentos). En este artículo se propone un nuevo método para realizar la tele operación de sistemas sin afectar su estabilidad. El método propone el uso de un método kinestésico que da una ilusión de telepresencia, pero no ofrece estabilidad. Por tal razón, este debe ser combinado con un sistema de retroalimentación de fuerza cutánea para brindar mayor estabilidad. El sistema fue evaluado a través de dos pruebas: el rol de los estímulos al reducir la kinésica y la medida en que una sobreactuación de la señal cutánea puede compensar por completo la falta de realimentación de fuerza kinestésica [27].
- *Integration of force reflection with tactile sensing for minimally invasive robotics-assisted tumor localization* (citado en 35 documentos). Este artículo presenta el desarrollo de un sistema Maestro-Esclavo para la búsqueda y localización de tumores. Para esto, se utilizó un manipulador antropomórfico con un sistema de retroalimentación de fuerza que permite tener un sensado táctil del órgano que el robot está tocando. El objetivo es la captura de información táctil y la medida de la iteración de fuerza entre la sonda y el tejido durante la palpación, permitiendo explorar cómo estos sistemas pueden ser integrados para mejorar la localización de un tumor en un paciente. Este procedimiento se hace de una forma mínimamente invasiva, lo cual contribuye a que el paciente tenga una recuperación más rápida. Los resultados arrojan una precisión superior a 50 %, logrando un mejor rendimiento de la localización del tumor con detección táctil a expensas de tiempos más largos para el usuario [28].
- *The impact of haptic feedback quality on the performance of teleoperated assembly tasks* (citado en 33 documentos). Este artículo lleva a cabo un estudio para determinar la mejor alternativa de retroalimentación según los operarios en un proceso de manipulación. El operador debe realizar la manipulación del mecanismo en un entorno difícil pero bien conocido por el operario, donde se prueban 4 tipos de respuesta háptica: sin retroalimentación háptica, retroalimentación táctil de baja frecuencia, retroalimentación táctil háptica combinada de baja y alta frecuencia y el mejor espectro de frecuencia táctil natural, equivalente a manipulación directa. Se evalúa la realización de 4 tareas: movimiento en espacio libre, transición de contacto, traslación restringida y tareas de rotación restringida. Finalmente, se concluye que el mejor desempeño se da al proporcionar retroalimentación háptica de baja frecuencia para los casos de rotaciones y translaciones restringidas [29].

3.8 Palabras clave *autonomous car* y los resultados obtenidos

title-abs-key (autonomous and car) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *The social dilemma of autonomous vehicles* (citado en 213 documentos). Este artículo aborda los principales problemas que afrontan los vehículos autónomos al momento de tomar decisiones, los cuales están relacionados principalmente con dilemas éticos como escoger entre accidentar peatones o accidentar a sus ocupantes. Por esta razón, es necesario introducir algoritmos que permitan alinear los valores humanos con las decisiones que pueden tomar los sistemas autónomos en situaciones poco probables. Se presentan los resultados de diferentes encuestas realizadas a un grupo de personas para conocer su opinión sobre la mejor acción que debería realizar el vehículo autónomo en diferentes escenarios con riesgo inminente de accidente con víctimas fatales [30].
- *Development of autonomous car – Part I: Distributed system architecture and development process* (citado en 69 documentos). En este trabajo se presenta una descripción de los elementos necesarios para diseñar un vehículo autónomo. Específicamente, este trabajo se enfoca en el desarrollo de una arquitectura distribuida y su explicación. Se precisan las funciones básicas que necesita un vehículo autónomo y se presentan sus definiciones. Adicionalmente, se realiza una comparación entre una arquitectura centralizada y una distribuida, mostrando las ventajas y desventajas para su implementación. Además, para el desarrollo de la plataforma de software, se propone la implementación de los protocolos establecidos en la plataforma AUTOSAR a fin de crear un sistema operativo que permita la flexibilidad de la implementación de nuevas funciones. Por último, la red FlexRay es implementada como red de comunicación para mejorar la tolerancia a fallos y reducir los tiempos de respuesta de la red distribuida [31].
- *Development of autonomous car – Part II: A case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture* (citado en 31 documentos). Este artículo presenta la implementación de la arquitectura

de control distribuida propuesta en la primera parte del artículo para el control de un vehículo autónomo. Sobre esta arquitectura se realiza la implementación de los diferentes algoritmos usados en la conducción autónoma: algoritmos de percepción, de localización, de planificación de trayectorias y de control. Además, se describen los diferentes dispositivos utilizados (sensores, actuadores y computadores). Por último, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas para evaluar el funcionamiento del vehículo autónomo llamado A1, el cual ocupó el primer puesto en el campeonato de vehículos autónomos de 2012 en Corea del Sur [32].

3.9 Palabras clave *automotive manufacture*

(Title-abs-key (automotive) and title-abs-key (manufacture)) and (limit-to (srctype, "j")) and (limit-to (doctype, "ar")) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *Friction stir welding: Process, automation, and control* (citado en 176 documentos). Este artículo presenta una introducción a los principios básicos de la soldadura por fricción y agitación (FSW) utilizada en procesos de manufactura. Estos principios incluyen temas como flujo de material, configuración de unión, diseño de herramientas, materiales y defectos. Adicionalmente, presenta las variantes del proceso, a saber: auto reacción, hombro estacionario, proceso de fricción-agitación, soldadura de punto de fricción y pulsado FSW. El artículo propone formas de realizar soldadura robótica basándose en máquinas CNC, donde se debe sensar la fuerza, controlar las trayectorias de la pieza a soldar y hacer un seguimiento de la unión de las piezas. Finalmente, se discuten los diferentes métodos para evaluar la calidad de la soldadura y las últimas aplicaciones con énfasis en la construcción aeroespacial, automotriz y naval [33].
- *A global sustainability perspective on 3D printing technologies* (citado en 172 documentos). En este artículo se aborda el uso de la impresión tridimensional (3DP) de manera sustentable, representando una tecnología novedosa en el marco de proyectos globalmente sostenibles que contribuyen a la mitigación del cambio climático en varios aspectos: costos del ciclo de vida del producto, consumo de energía y nivel de emisiones de CO₂ a nivel mundial para 2025. Los cálculos realizados muestran que la tecnología de impresión 3D tiene el potencial de reducir costos entre 170 y 593 billones de dólares. Si fuese aplicable a volúmenes de producción más grandes en productos de consumo o en la fabricación de automóviles, esta tecnología tendría el potencial (teórico) para desacoplar totalmente la energía y las emisiones de CO₂ de la actividad económica. Este artículo es un aporte importante para el desarrollo de proyectos con carácter sostenible que ayudan a mejorar la calidad de vida a partir de la implementación de sistemas mecatrónicos de alto impacto [34].

3.10 Palabras clave *artificial intelligence robots y los resultados generados*

(title-abs-key (artificial and intelligence) and title-abs-key (robots)) and (limit-to (srctype, "j")) and (limit-to (doctype, "ar")) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *Robots that can adapt like animals* (citado en 175 documentos). Este artículo resalta las características que tienen ciertos animales para adaptarse a los daños o heridas que pueden sufrir. Tales características pueden ser utilizadas por los robots para diversas tareas, como exploraciones en desastres, ingresar a zonas de peligro o realizar rescates. En un enfoque tradicional de robótica, los robots son reparados en el lugar donde presentaron algún daño. Sin embargo, en ocasiones no es posible llegar hasta el robot, o simplemente esto implica bastante tiempo y dinero. En este artículo se propone una metodología de adaptación para que los robots se configuren a topologías de animales que les permitan ser autosuficientes en caso de presentar una avería de tipo estructural o motora, replicando la capacidad de adaptación de ciertos animales ante condiciones adversas [35].
- *Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning* (citado en 128 documentos). Este artículo describe un nuevo algoritmo optimizador de inteligencia de enjambres bioinspirado en palomas (PIO). Este algoritmo propone el uso de mapas y brújulas con base en el campo magnético de la tierra y el sol, mientras que un modelo de operador de señales de referencia se presenta con base en puntos de referencia ubicadas en el suelo. El algoritmo fue aplicado para resolver problemas de planificación del camino del robot aéreo e introduce una formulación de recursos de amenazas y la función objetivo en la planificación del camino. Adicionalmente, se describe el comportamiento natural de las palomas y se presenta el modelo matemático básico de una paloma para su posterior implementación [36].
- *Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot* (citado en 111 documentos). Este trabajo presenta un ejemplo de robots blandos a partir del diseño y construcción de una serpiente que contiene todos los elementos necesarios para su funcionamiento: el control, las comunicaciones, las fuentes de alimentación y los actuadores. Este robot puede presentar un movimiento muy similar a su contraparte biológica sin la intervención humana, gracias al uso de actuadores con fluidos elastómeros que se mueven a

presión. El sistema de actuación de este robot se compone de un mini-compresor, cuatro actuadores bidireccionales con fluido elastómero, válvulas direccionales para controlar la entrada y salida del actuador y un control de presión que le permiten un movimiento sin ángulos discretos, como ocurre cuando se utilizan actuadores como los servomotores [37].

3.11 Palabras clave *learning in robots*

title-abs-key (learning and in and robots) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013))

- *Learning to select and generalize striking movements in robot table tennis* (citado en 129 documentos). Este trabajo presenta una nueva metodología que le permite a un manipulador robótico tener un aprendizaje colaborativo a través de su interacción con el ser humano. El robot comienza su aprendizaje por medio de las demostraciones que realiza el humano utilizando una enseñanza kinestésica. Estos movimientos conforman un set llamado movimientos primitivos. El sistema identifica cuándo, dónde y cómo debe ser golpeada una bola presente en el robot. Seguidamente el sistema realiza una generalización de estos movimientos a un rango amplio de posibles situaciones, es decir, la capacidad del manipulador de realizar los movimientos necesarios para dar un golpe a la bola y enviarla a un punto fijo [38].
- *Active learning of inverse models with intrinsically motivated goal exploration in robots* (citado en 120 documentos). Este artículo propone un método inspirado en los procesos de exploración y aprendizaje de los seres humanos para aprender modelos inversos en robots. Para ello, se combinan dos principios para el aprendizaje eficiente de modelos inversos de múltiples dimensiones en espacios continuos: la exploración activa de objetivo/tarea en un espacio de tareas parametrizadas y el *interestingness* como evaluación empírica del progreso de la competencia. Se presenta la aplicación del método en varios ejemplos, tales como el aprendizaje de la cinemática inversa de un manipulador robótico de 15 grados de libertad, el aprendizaje de la locomoción cuadrúpeda omnidireccional con sinergia de motores y el aprendizaje del control de una caña de pescar con sinergia de motores [39].

3.12 Palabras *nanotechnology smart sensors*

(title-abs-key (nanotechnology) and title-abs-key (smart and sensors)) and (limit-to (srctype, "j")) and (limit-to (doctype, "ar")) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *Stretchable silicon nanoribbon electronics for skin prosthesis* (citado en 237 documentos). En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema de piel artificial que puede ser implementado en prótesis inteligentes. Este tipo de piel presenta un funcionamiento similar al de la piel natural, enviando señales como presión y temperatura al cerebro, entre otras. Sin embargo, los desarrollos actuales de estos sensores tienen limitaciones de elasticidad, rango de detección y resolución espacio-temporal. Para solucionar los problemas de elasticidad se propone el uso de una nanocinta cristalina de silicio con matrices de sensores de presión, temperatura, humedad, calentadores de resistencia eléctrica y matrices de electrodos, los cuales permitirán realizar la estimulación nerviosa. Estos sensores y actuadores son fácilmente localizados en las estructuras, brindando la posibilidad de crear una tecnología emergente en prótesis inteligentes [40].
- *Taxel-addressable matrix of vertical-nanowire piezotronic transistors for active and adaptive tactile imaging* (Citado en 424 documentos). Este artículo presenta cómo el diseño, la fabricación e integración de matrices de nano dispositivos en un sistema funcional permiten la transferencia de sistemas en nano escala a nanotecnología aplicable. En este caso, se presenta un circuito tridimensional de transistores piezoeléctricos basados en nano cables de óxido de zinc verticales para replicar sensores de presión/fuerza para imágenes táctiles. El trabajo de este artículo se centra en crear un sensor inteligente basado en nanotecnología que convierte los estímulos mecánicos en señales de control electrónico local, permitiendo la interconexión humano-electrónica en aplicaciones como la creación de piel inteligente o prototipos de robot con sensibilidad en sus extremidades y estructura [41].
- *Super-stretchable, transparent carbon nanotube-based capacitive strain sensors for human motion detection* (citado en 285 documentos). Este artículo presenta un nuevo nanotubo de carbón (CNT) multifuncional basado en sensores capacitivos que pueden detectar una tensión 300 % superior a su tensión nominal, con una alta repetitividad y durabilidad, incluso después de 1.000 ciclos. Los dispositivos de medición de tensión basados en CNT presentan una respuesta lineal y determinística en todos los puntos de operación de la galga extensométrica muy cercanos a los valores estimados. En los test de pruebas el sensor muestra una excelente habilidad para el sensado dinámico sin sobre picos o relajación de la señal, y una respuesta rápida. Estas características son utilizadas para desarrollar un sensor multifuncional basado en galgas extensiométricas CNT capaz de estirarse, el cual tiene aplicaciones en humanos como la detección de movimiento [42].

3.13 Palabras claves *nanotechnology robotics*

title-abs-key (nanotechnology and robotics) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)).

- *Untethered micro-robotic coding of three-dimensional material composition* (citado en 108 documentos). En este artículo se presenta un método para ensamblar estructuras 2D y 3D usando micro robots sin sujeción. Se da a conocer un microrobot controlado por campos magnéticos que puede ser introducido en microfluidos y manipulado en 3 dimensiones. El control en tiempo y espacio del microrobot permite su uso para el ensamblaje y la creación de materiales o estructuras complejas en 3D compuestas de microcomponentes, haciéndolas dinámicas y reconfigurables. Este método ofrece una precisión de hasta 10 micrómetros, así como la capacidad de crear combinaciones de materiales suaves y rígidos [43].
- *A highly sensitive and flexible pressure sensor with electrodes and elastomeric interlayer containing silver nanowires* (citado en 100 documentos). Debido a las diversas aplicaciones que tienen los sensores de presión –como su implementación en piel artificial, robots humanoides, dispositivos portátiles o prótesis inteligentes–, este trabajo presenta un procedimiento que permite llevar a cabo su producción de manera más simple y a gran escala, reduciendo sus costos de fabricación y, por consiguiente, su precio final. Para la producción del sensor se utiliza una malla de nano hilos de plata inicialmente utilizada como electrodos para sensores capacitivos debido a su flexibilidad, su costo de producción eficiente y su buena adaptación a otros dispositivos. La capacitancia del sensor se relaciona con la aplicación de una capa dieléctrica entre los electrodos, por lo que la sensibilidad del mismo aumenta por el uso de una capa de material de poliuretano. Finalmente, este trabajo presenta las diferentes pruebas realizadas para medir características del sensor como reproducibilidad e histéresis [44].
- *Molecular robotics: A new paradigm for artifacts* (citado en 62 documentos). En este trabajo se introduce el concepto de robótica molecular, el cual permite dar un alcance más profundo a las definiciones convencionales que utilizamos en robots. Esta área de estudio favorece la creación de robots con una estructura más flexible e introduce una mayor relación dinámica entre el robot y su ámbito. Por tal razón, las estructuras de los robots moleculares no son ensambladas en una fábrica, sino que son acopladas autónomamente adaptándose a su entorno. Se propone un plan para la evolución de robots moleculares por medio de las actividades de investigación en el área. Finalmente, el artículo hace una descripción del estado del arte y presenta las perspectivas sobre el tema [45].
- *Wireless endoscopy in 2020: Will it still be a capsule?* (Citado en 28 documentos). Este trabajo presenta el estado del arte en dispositivos para realizar endoscopias inalámbricas. Estos sistemas nacen de la necesidad, por parte de los médicos, de desarrollar exámenes internos sin tener que realizar cirugías a los pacientes. En la actualidad, las endoscopias inalámbricas presentan como falencia la imposibilidad de realizar un control de movimiento sobre la capsula endoscópica. Este control de movimiento le permitiría a un médico detener el movimiento de la cápsula en algún punto del recorrido y poder realizar desplazamientos hacia puntos de interés que considere pertinentes. Actualmente, existen diversos dispositivos comerciales con un avanzado desarrollo que permitirán solventar esta falencia, por lo que se espera que en menos de 5 años este problema haya sido solucionado [46].

3.14 Palabras claves *education in mechatronics* y los resultados generados tras su aplicación

title-abs-key (education and in and mechatronics) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)) and (limit-to (doctype, "ar")).

- *Experiences in developing an experimental robotics course program for undergraduate education* (citado en 37 documentos). Este artículo describe una metodología de enseñanza para estudiantes de ingeniería interesados en el área de robótica y control, que les permite afianzar los procesos de aprendizaje utilizando Robots LEGO. En clase, los estudiantes aprenden las teorías detrás de la robótica y las practican realizando estudios de simulación. Paralelamente, estos realizan ejercicios de robótica en el laboratorio mediante un kit experimental de robots humanoides, robots industriales y robots de servicio doméstico. El curso presenta actividades de divulgación asociadas a robótica con el fin de cubrir los ejes temáticos del plan de estudios del programa de mecatrónica [47].
- *Cloud E-learning for mechatronics: CLEM* (citado en 16 documentos). En este artículo se describe el proyecto *Cloud E-learning for Mechatronics* (CLEM) enfocado a la educación en mecatrónica. CLEM es un interesante desarrollo de herramientas para la enseñanza y entrenamiento que permite el acceso remoto de los estudiantes a laboratorios eliminando barreras de espacio/tiempo. De esta forma, se brinda una mayor flexibilidad tanto a profesores como a estudiantes, ayudando además a las instituciones a compartir sus laboratorios. La infraestructura de la nube permite que múltiples laboratorios se unan e intercambien información virtualmente en tiempo real, creando un ecosistema para educadores y estudiantes. El documento proporciona una visión general de este nuevo enfoque de *e-learning* basado en la nube [48].

3.15 Palabras claves *control trends in robotics* y los resultados arrojados por la base de datos

title-abs-key (control and trends and in and robotics) and (limit-to (pubyear, 2018) or limit-to (pubyear, 2017) or limit-to (pubyear, 2016) or limit-to (pubyear, 2015) or limit-to (pubyear, 2014) or limit-to (pubyear, 2013)) and (limit-to (doctype, "ar")) and (limit-to (subjarer, "engi"))).

- *Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons* (citado en 174 documentos). Este artículo presenta una revisión del estado del arte sobre las estrategias de control aplicadas en diversas órtesis y exoesqueletos de miembro inferior publicadas desde 1960. En total, se revisaron 520 artículos, de los cuales 178 fueron clasificados según la estrategia de control. La interacción exoesqueleto-humano se realiza de forma bidireccional, siendo el robot el encargado de realizar el movimiento mecánico y retroalimentar esta información por medio de sensores. La intensidad de movimiento es percibida y enviada hacia la estrategia de control para determinar el valor del movimiento que debe ser realizado por el exoesqueleto [49].
- *Robot-based construction automation: An application to steel beam assembly (Part I)* (citado en 20 documentos). Este artículo presenta el diseño de una máquina para construir edificios con estructura en vigas de acero. La máquina está dividida en 2 partes controladas desde una estación central: la primera se encarga de ensamblar las vigas de acero y la segunda de transportarlas y ubicarlas en la posición donde deben ser atornilladas a la estructura. El control del sistema se realiza utilizando sistemas de visión y procesamiento de imágenes por medio de una cámara acoplada a la máquina. Se presenta el diseño del sistema mecánico de la máquina encargada de ensamblar las vigas según las especificaciones, así como los resultados experimentales obtenidos [50].
- *Design of a direct-driven linear actuator for a high-speed quadruped robot, cheetaroid-I.* (citado en 17 documentos). Este trabajo presenta la metodología de diseño para realizar el control de posición de las piernas en un robot cuadrúpedo. Para este fin, se realiza el diseño del mecanismo de movimiento basado en la reproducción de los movimientos de una chita. Seguidamente, se presenta su análisis cinemático y el diseño del actuador lineal. La elección del actuador lineal se debe a los criterios de alta velocidad y respuesta en un alto rango de frecuencias respuesta. Igualmente, el mecanismo debe responder con una fuerza elevada requerida; por tal razón, se escogió un sistema de accionamiento directo compuesto por motor acoplado al tornillo. El motor utilizado es un motor DC sin escobillas, lo cual le permite un movimiento de alta velocidad [51].
- *Robot-based construction automation: An application to steel beam assembly (Part II)* (citado en 15 documentos). Este artículo presenta el diseño de la segunda parte de la máquina para construir estructuras de edificios, la cual se encarga de realizar el transporte de las piezas ensambladas. El mecanismo de transporte consta de 2 partes: un elevador y un mecanismo de desplazamiento. El mecanismo de desplazamiento sobre riel bloquea el elevador y lo transporta alrededor del edificio. En el artículo se presenta el diseño del mecanismo realizado y las especificaciones tenidas en cuenta para su diseño. Seguidamente, se presenta el sistema de control y la ejecución de la iteración hombre-máquina por medio de HMI. Finalmente, se presentan las pruebas de implementación y los resultados obtenidos [52].
- *A multidisciplinary approach for model predictive control education: A lego mindstorms NXT-based framework* (citado en 11 documentos). En este artículo se desarrolla una metodología experimental con propósitos educativos. Se presenta el diseño e introducción de un modelo de control predictivo para un péndulo invertido desarrollado con material didáctico Lego Mindstorm NXT. Esta plataforma es compatible con sistemas de desarrollo de código abierto nXTOSEK que incluyen un sistema de operación en tiempo real y puede ser comunicado con un computador corriendo Matlab. El artículo es presentado en diferentes secciones y establece el procedimiento, la implementación y la presentación de resultados obtenidos [53].

4. ANÁLISIS DE CONCURRENCIA

La Figura 2 muestra cinco grupos de palabras. Las palabras agrupadas con el color azul señalan investigaciones en mecatrónica con fines educativos. El color rojo asocia los trabajos realizados en el desarrollo de conceptos propios de la disciplina (sensores, actuadores, teoría de control, etc.). El color púrpura señala trabajos que integran conceptos de robótica y el color amarillo todos los trabajos relacionados con la medicina. Finalmente, el color verde muestra los trabajos con énfasis en sistemas mecatrónicos para la industria. Dentro de este grupo las palabras manufactura, prototipo rápido, impresoras 3D y automatización son los términos más frecuentes. Con el fin de encontrar las tendencias investigativas en automatización y mecatrónica se usó la siguiente ecuación de búsqueda: *title-abs-key (mechatronics and automation)*.

Por su parte, la Figura 3 muestra el análisis de concurrencia de estas palabras claves, mostrando una relación fuerte con la palabra mecatrónica inteligente, la cual nos lleva a otras palabras como redes neuronales, inteligencia artificial, modelos matemáticos y procesamiento de imágenes. Estas palabras clave corresponden a trabajos que generan algoritmos que deben ser embebidos a dispositivos o artefactos para la industria manufacturera. Entre los artículos

más citados están [53], [54] con estas palabras describen nuevas formas de aproximarse a los nuevos sistemas de manufactura, los cuales están compuestos por agentes. Ambos trabajos definen a un agente como una entidad de software situada en una línea de producción con suficiente inteligencia para tomar decisiones autónomas en cooperación con otras entidades para la realización de un objetivo de diseño. Es importante señalar que un agente debe ser capaz de actuar sin la intervención del humano. En el trabajo realizado por Vyatkin *et al.* [54] se describen componentes inteligentes que hacen partes de máquinas; estas, a su vez, pertenecen a un proceso de producción.

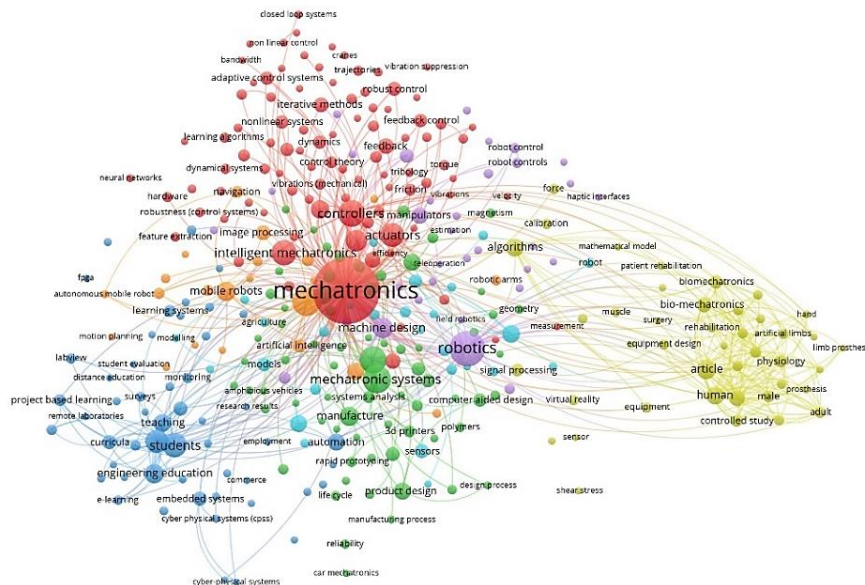


Figura 2. Red de palabras clave generadas en VOSviewer tras la búsqueda de artículos con la palabra *mechatronics*

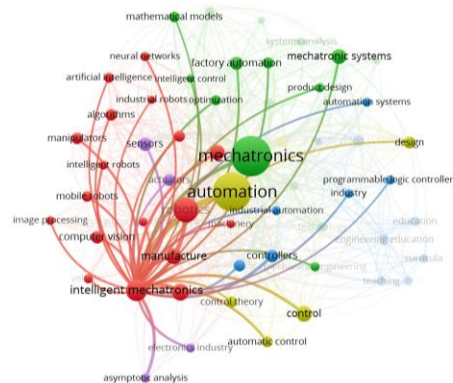


Figura 3. Red de palabras clave generadas en a través de la búsqueda de artículos con las palabras *mechatronics* y *automation*

5. CONCLUSIONES

Esa revisión de la literatura muestra que la ingeniería mecatrónica posee un amplio número de aplicaciones debido a su esencia sinérgica. Estas aplicaciones pueden presentarse en áreas que son muy diferentes entre sí, que van desde la medicina hasta la construcción, pero que encuentran temas convergentes en elementos fundamentales de la mecatrónica como los sensores, los actuadores y los sistemas de control.

En la actualidad las investigaciones en ingeniería mecatrónica están centradas en los siguientes temas, según su área de cobertura:

- IoT: desarrollo de dispositivos con conexión a internet que permiten controlar y supervisar procesos. Esta tecnología ha sido más accesible debido a la implementación de redes 4G y de dispositivos móviles con acceso a internet, ya que este tipo de aplicaciones son comunes en esta industria a través del uso de redes industriales ethernet de diferentes fabricantes como Siemens, Schneider Electric, Rockwell, etc.
- Salud
 - Exoesqueletos: actualmente se presentan desarrollos de exoesqueletos para la rehabilitación de miembros inferiores y superiores con diferentes técnicas de control. Igualmente, se trabaja en mejorar el procesamiento, la lectura y la segmentación de las señales micro eléctricas usadas como señales de control.
 - El desarrollo de sistemas robóticos que permiten realizar cirugías y exámenes de forma poco invasiva.

- **Sistemas autónomos**
 - El desarrollo de vehículos autónomos está en un nivel de autonomía tipo 4, lo que significa que aún se necesita la intervención del humano en ciertas situaciones. Sin embargo, muchos de estos desarrollos se han obtenido por medio del uso de sensores y dispositivos con un alto valor comercial, lo cual no permite su comercialización.
 - El desarrollo de robots de servicio que permitan la reducción de tiempos y mejorar la eficiencia en diferentes tareas manuales (robots en agricultura para inspección, reparación y recolección de frutos).
 - Automatización industrial: desarrollo de sensores o dispositivos que permitan la implementación inalámbrica de otros sensores. Actualmente, se trabaja bajo limitaciones de velocidad de transmisión, lo cual solo los hace viables para su aplicación en el monitoreo de procesos y en sistemas de control con bajas velocidades de respuesta como procesos de control de temperatura.
 - Manufactura: desarrollo de productos que se adapten a las limitaciones de los materiales utilizados en impresoras 3D. Este sistema ofrece una mayor flexibilidad para el desarrollo de piezas y productos que serían muy difíciles o imposibles de fabricar por medio de sistemas cnc o de métodos de fabricación manual.
 - Inteligencia artificial: la implementación del deep learning ha permitido un mayor desarrollo de la ai en comparación con el enfoque tradicional de redes neuronales. Este tipo de redes permiten una mayor capacidad de aprendizaje y es actualmente utilizado para procesos de reconocimiento, segmentación y asociación en diferentes aplicaciones agrícolas, de vehículos autónomos y el procesamiento de información.
- **Educación**
 - La utilización de herramientas que permitan hacer un prototipo rápido de una idea, probarla y observar sus resultados. Una de estas herramientas es el Lego Mindstorm nxt, el cual permite una fácil iteración con herramientas de código abierto y su integración con Matlab.
 - El desarrollo de laboratorios virtuales que permitan a los estudiantes una mayor flexibilidad para realizar sus prácticas, eliminando la dependencia de un sistema físico que puede ser costoso y limitado en sus existencias. De otra parte, la conversión a sistemas CPS de máquinas o laboratorios permitirá un intercambio virtual de estos con otras universidades.

De otro lado, es posible identificar perspectivas en áreas con aplicaciones ya conocidas. Sin embargo, son temas de investigación abiertos que aún presentan diversos problemas por solucionar. Algunos ejemplos de esta situación según el área de cobertura son:

- **IoT:** la posibilidad de acceso a todos los dispositivos debe ir de la mano con desarrollos en sistemas de seguridad que prevengan el hackeo.
- **Salud**
 - La evolución de exoesqueletos que permitan alcanzar el ideal de brindar a personas cuadripléjicas una total independencia.
 - El desarrollo de nano sensores para la creación de piel artificial que pueda ser incorporada a las prótesis, emulando todas las características de la piel natural.
 - La implementación de micro robots que puedan ser ingeridos o inyectados en las personas y ser controlados de forma externa para realizar exámenes o posiblemente cirugías.
 - Desarrollo de sistemas robóticos en telemedicina que permitan hacer cirugías y exámenes de forma totalmente remota, para lo cual se deben desarrollar sensores o trajes que permitan al médico tener los estímulos de temperatura, fuerza, sonido y tacto.
- **Vehículos autónomos**
 - Progreso de los sistemas autónomos para la agricultura, pasando de un sistema específico para la realización de una tarea, a un sistema flexible que permita realizar un mayor número de actividades.
 - Importantes avances en la creación de algoritmos para manejar autónomamente un área específica. No obstante, este es un tema abierto a la investigación, principalmente en aspectos relacionados con la sustitución de funciones de sensores de alto costo (*e. g.* sensores LIDAR) por sensores de bajo costo como cámaras, haciendo esta tecnología viable desde el punto de vista económico.
- **Inteligencia artificial**
 - En un enfoque tradicional, el control de un sistema como los quadrotor conlleva al desarrollo de modelos matemáticos complejos. La implementación de técnicas de inteligencia artificial –donde a través de la enseñanza de una tarea y la ejecución de repeticiones simuladas se puede realizar el control de un quadrotor o sistema para ejecutar la tarea deseada– reduce la complejidad propia de un enfoque tradicional.

- Dada la cantidad de información generada cada día, es imposible para un ser humano trabajar grandes volúmenes de información. Esto conlleva a la creación de sistemas basados en inteligencia artificial que permiten procesar información con sentido lógico, así como analizar textos e información en grandes cantidades.
- Integración humanos-robots
 - Un objetivo de la manufactura es la implementación de robots humanoides con la capacidad de realizar tareas de ensamble en procesos flexibles de manufactura. Para lograr este objetivo es necesario dotar al robot de capacidades como visión y toma de decisiones.
 - La implementación de la realidad aumentada permitirá el desarrollo de tareas como la reparación de máquinas o cirugías, utilizando como actuador un robot dotado con sensores que le permitirán al operador tener las mismas sensaciones de velocidad, fuerza, temperatura y realizar los mismos movimientos que el operador necesita para llevar a cabo su tarea de forma remota.
- Automatización industrial
 - El surgimiento de las próximas redes de comunicación de quinta generación permitirá la proliferación de dispositivos inalámbricos para la ejecución de tareas. En automatización industrial se podría tener control de procesos en tiempo real a través del uso de redes inalámbricas con sensores y actuadores que no requieren ser cableados.
 - Los sistemas ciberfísicos (CPS) podrán ayudar al surgimiento de las empresas o reducir sus costos de operación. Las máquinas de una empresa podrán ser usadas de forma remota, lo cual permitirá generar una reducción de los costos de inversión.

REFERENCIAS

- [1] IRDAC, "Opinion on R&D needs in the field of mechatronics," in Industry R&D Advisory Committee of the Comm. of the EC, Brussels, 1986.
- [2] K. Craig, "Is anything really new in mechatronics education?" *IEEE Robot. & Autom. Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 12–19, 2001.
- [3] N. Van Eck and L. Waltman, "Visualizing bibliometric networks," in *Measuring scholarly impact*, pp. 285–320, 2014.
- [4] R. Todeschini and A. Baccini, *Handbook of bibliometric indicators: Quantitative tools for studying and evaluating research*. John Wiley & Sons, 2016.
- [5] B. T. Wittbrodt et al., "Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers," *Mechatronics*, vol. 23, no. 6, pp. 713–726, 2013.
- [6] H. M. La et al., "Mechatronic systems design for an autonomous robotic system for high-efficiency bridge deck inspection and evaluation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 6, pp. 1655–1664, 2013.
- [7] J. A. Saglia, N. G. Tsagarakis, J. S. Dai, and D. G. Caldwell, "Control strategies for patient-assisted training using the ankle rehabilitation robot (ARBOT)," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 6, pp. 1799–1808, 2013.
- [8] U. Önen, F. M. Botsali, M. Kalyoncu, M. Tinkir, N. Yilmaz, and Y. Şahin, "Design and actuator selection of a lower extremity exoskeleton," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 2, pp. 623–632, 2014.
- [9] D. Bradley, D. Russell, I. Ferguson, J. Isaacs, A. Macleod, and R. White, "The Internet of Things - The future or the end of mechatronics," *Mechatronics*, vol. 27, pp. 57–74, 2015.
- [10] N. A. Radford et al., "Valkyrie: NASA's First Bipedal Humanoid Robot," *Jou. Field Robotics*, vol. 32, no. 3, pp. 397–419, 2015.
- [11] I. Ben, Y. Bouteraa, and C. Rekik, "Design and development of 3d printed myoelectric robotic exoskeleton for hand rehabilitation," *International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 341–366, 2017.
- [12] C. Majidi, "Soft Robotics: A Perspective - Current trends and prospects for the future," *Soft Ro.*, vol. 1, no. 1, pp. 5–11, 2014.
- [13] A. van Wynsberghe, "Designing Robots for Care: Care Centered Value-Sensitive Design," *Science and engineering ethics*, vol. 19, no. 2, pp. 407–433, 2013.
- [14] L. Emmi, M. Gonzalez-De-Soto, G. Pajares, and P. Gonzalez-De-Santos, "New trends in robotics for agriculture: Integration and assessment of a real fleet of robots *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014.
- [15] A. Bechar and C. Vigneault, "Agricultural robots for field operations: Concepts and components," *Biosystems Engineering*, vol. 149, pp. 94–111, 2016.
- [16] I. Sa, Z. Ge, F. Dayoub, B. Upcroft, T. Perez, and C. McCool, "Deepfruits: A fruit detection system using deep neural networks," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 8, 2016.
- [17] M. Vázquez-Arellano, H. W. Griepentrog, D. Reiser, and D. S. Paraforos, "3-D imaging systems for agricultural applications—a review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, 2016.
- [18] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite, "The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 17–27, 2017.
- [19] P. Leitão, A. W. Colombo, and S. Karnouskos, "Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges," *Computers in Industry*, vol. 81, pp. 11–25, 2016.
- [20] S. Weyer, M. Schmitt, M. Ohmer, and D. Gorecky, "Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 579–584, 2015.
- [21] S. X. Ding, P. Zhang, S. Yin, and E. L. Ding, "An integrated design framework of fault-tolerant wireless networked control systems for industrial automatic control applications," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 462–471, 2013.
- [22] X. Wang, M. J. Kim, P. E. D. Love, and S.-C. Kang, "Augmented reality in built environment: Classification and implications for future research," *Automation in construction*, vol. 32, pp. 1–13, 2013.

- [23] R. Harrison, D. Vera, and B. Ahmad, "Engineering Methods and Tools for Cyber-Physical Automation Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 973–985, 2016.
- [24] S. D. T. Kelly, N. K. Suryadevara, and S. C. Mukhopadhyay, "Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes," *IEEE sensors journal*, vol. 13, no. 10, pp. 3846–3853, 2013.
- [25] P. J. Zarco-Tejada, R. Diaz-Varela, V. Angileri, and P. Loudjani, "Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods," *European journal of agronomy*, vol. 55, pp. 89–99, 2014.
- [26] Z. Ma and P. Ben-Tzvi, "RML glove-an exoskeleton glove mechanism with haptics feedback," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 641–652, 2015.
- [27] C. Pacchierotti, A. Tirmizi, and D. Prattichizzo, "Improving transparency in teleoperation by means of cutaneous tactile force feedback," *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 11, no. 1, 2014.
- [28] A. Talasaz and R. V Patel, "Integration of force reflection with tactile sensing for minimally invasive robotics-assisted tumor localization," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 2, pp. 217–228, 2013.
- [29] J. Wildenbeest, D. Abbink, C. Heemskerk, F. Van Der Helm, and H. Boessenkool, "The impact of haptic feedback quality on the performance of teleoperated assembly tasks," *IEEE Tran. on Haptics*, vol. 6, no. 2, pp. 242–252, 2013.
- [30] J.-F. Bonnefon, A. Shariff, and I. Rahwan, "The social dilemma of autonomous vehicles," *Science*, vol. 352, no. 6293, pp. 1573–1576, 2016.
- [31] K. Jo, J. Kim, D. Kim, C. Jang, and M. Sunwoo, "Development of autonomous car-part i: Distributed system architecture and development process," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 7131–7140, 2014.
- [32] K. Jo, J. Kim, D. Kim, C. Jang, and M. Sunwoo, "Development of Autonomous Car - Part II: A Case Study on the Implementation of an Autonomous Driving System Based on Distributed Architecture," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, pp. 5119–5132, 2015.
- [33] B. T. Gibson et al., "Friction stir welding: Process, automation, and control," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 16, no. 1, pp. 56–73, 2014.
- [34] M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp, and C. Visser, "A global sustainability perspective on 3D printing technologies," *Energy Policy*, vol. 74, no. C, pp. 158–167, 2014.
- [35] A. Cully, J. Clune, D. Tarapore, and J.-B. Mouret, "Robots that can adapt like animals," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 503–507, 2015.
- [36] H. Duan and P. Qiao, "Pigeon-inspired optimization: A new swarm intelligence optimizer for air robot path planning," *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, vol. 7, no. 1, pp. 24–37, 2014.
- [37] C. D. Onal and D. Rus, "Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 8, no. 2, 2013.
- [38] K. Mülling, J. Kober, O. Kroemer, and J. Peters, "Learning to select and generalize striking movements in robot table tennis," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 3, pp. 263–279, 2013.
- [39] A. Baranes and P.-Y. Oudeyer, "Active learning of inverse models with intrinsically motivated goal exploration in robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, no. 1, pp. 49–73, 2013.
- [40] J. Kim et al., "Stretchable silicon nanoribbon electronics for skin prosthesis," *Nature communications*, vol. 5, 2014.
- [41] W. Wu, X. Wen, and Z. L. Wang, "Taxel-addressable matrix of vertical-nanowire piezotronic transistors for active and adaptive tactile imaging," *Science*, vol. 340, no. 6135, pp. 952–957, 2013.
- [42] L. Cai et al., "Super-stretchable, transparent carbon nanotube-based capacitive strain sensors for human motion detection," *Scientific reports*, vol. 3, 2013.
- [43] S. Tasoglu, E. Diller, S. Guven, M. Sitti, and U. Demirci, "Untethered micro-robotic coding of three-dimensional material composition," *Nature communications*, vol. 5, 2014.
- [44] J. Wang et al., "A highly sensitive and flexible pressure sensor with electrodes and elastomeric interlayer containing silver nanowires," *Nanoscale*, vol. 7, no. 7, pp. 2926–2932, 2015.
- [45] S. Murata, A. Konagaya, S. Kobayashi, H. Saito, and M. Hagiya, "Molecular robotics: A new paradigm for artifacts," *New Generation Computing*, vol. 31, no. 1, pp. 27–45, 2013.
- [46] A. Koulaouzidis, D. K. Iakovidis, A. Karargyris, and E. Rondonotti, "Wireless endoscopy in 2020: Will it still be a capsule?" *World journal of gastroenterology*, vol. 21, no. 17, pp. 5119–5130, 2015.
- [47] S. Jung, "Experiences in developing an experimental robotics course program for undergraduate education," *IEEE Transactions on Education*, vol. 56, no. 1, pp. 129–136, 2013.
- [48] K.-M. Chao et al., "Cloud E-learning for Mechatronics: CLEM," *Future Generation Comp. Systems*, vol. 48, pp. 46–59, 2015.
- [49] T. Yan, M. Cempini, C. M. Oddo, and N. Vitiello, "Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 64, pp. 120–136, 2015.
- [50] B. Chu, K. Jung, M.-T. Lim, and D. Hong, "Robot-based construction automation: An application to steel beam assembly (Part II)," *Automation in construction*, vol. 32, pp. 62–79, 2013.
- [51] B. Na, H. Choi, and K. Kong, "Design of a direct-driven linear actuator for a high-speed quadruped robot, cheetaroid-I," *Mechatronics IEEE/ASME Transactions on*, vol. 20, no. 2, pp. 924–933, 2015.
- [52] M. Canale and S. Casale-Brunet, "A multidisciplinary approach for Model Predictive Control Education: A Lego Mindstorms NXT-based framework," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 12, no. 5, pp. 1030–1039, 2014.
- [53] A. W. Colombo, R. Schoop, and R. Neubert, "An agent-based intelligent control platform for industrial holonic manufacturing systems," *IEEE transactions on industrial informatics*, vol. 53, no. 1, pp. 322–337, 2006.
- [54] V. V Vyatkin, J. H. Christensen, and J. L. M. Lastra, "OOONEIDA: An open, object-oriented knowledge economy for intelligent industrial automation," *IEEE transactions on industrial informatics*, vol. 1, no. 1, pp. 4–16, 2005.

Caracterización mecánica a tensión de impresiones 3D de PLA y ABS modeladas por deposición fundida

Daniel Agudelo¹

David Díaz²

Andrés Ibarra³

Carlos Cruel⁴

Miguel Montoya⁵

Camilo Hernández⁶

¹⁻⁴ Universidad de San Buenaventura

^{5,6} Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

El modelo productivo actual y el desarrollo de nuevos productos de forma rápida y óptima han impulsado cada vez más el uso de técnicas de prototipado rápido. Dentro de las técnicas de prototipado rápido, la impresión 3D mediante el modelamiento por deposición de hilo fundido se ha posicionado debido a su versatilidad, facilidad y economía [1]. Por esta razón, muchos prototipos e inclusive piezas funcionales cada vez son más usadas en diferentes aplicaciones de la ingeniería. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los modelos impresos en 3D mediante esta técnica en muchas ocasiones no son conocidas. En este trabajo se caracterizaron las propiedades mecánicas de dos de los materiales más comúnmente usados para realizar modelos impresos 3D por deposición de hilo fundido: el ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). La caracterización mecánica se realizó mediante pruebas de tensión en dos direcciones; dirección axial a la dirección de impresión y dirección transversal a la dirección de impresión. Se determinaron para ambos materiales los módulos de elasticidad en ambas direcciones, los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones, las resistencias a tensión y las deformaciones de fractura en ambas direcciones. Los resultados de las pruebas a tensión permitieron concluir que tanto el PLA como el ABS presentan un comportamiento mecánico isotrópico en su parte elástica, es decir, no se presentaron diferencias significativas en los módulos de elasticidad en ambas direcciones. En cambio, las propiedades plásticas determinadas, esfuerzo de fluencia, resistencia a la tensión y deformación de fractura, mostraron un comportamiento ortotrópico. En otras palabras, las propiedades mecánicas en dirección axial a la impresión fueron más altas que las mostradas en dirección transversal. Esta diferencia en las propiedades se explicó debido a que la falla en ambas direcciones mostró diferentes modos. Mientras que en la dirección axial a la impresión se observó una falla dúctil del polímero termoplástico, en la dirección transversal a la dirección de impresión se observó delaminación y separación de los hilos de extrusión remanentes de la impresión. Por último, se compararon las propiedades mecánicas de ambos materiales, mostrando que el PLA tiene mejores propiedades mecánicas que el ABS.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el constante crecimiento comercial y tecnológico ha creado la necesidad de diseñar y manufacturar piezas y componentes mecánicos con mucha rapidez y a bajos costos. Esto ha hecho que nuevas técnicas de producción rápida como la manufactura aditiva surjan como una alternativa para disminuir tiempos y costos del proceso de desarrollo de nuevos productos [2].

Dentro de las técnicas de manufactura aditiva se destaca la impresión 3D por su capacidad de fabricar estructuras con geometrías complejas a partir de modelos computacionales tridimensionales [3]. Este proceso consiste en depositar controladamente sobre una superficie capas sucesivas de material para formar una estructura previamente diseñada. Dentro de este tipo de métodos, se encuentra el modelado por deposición fundida o FDM por sus siglas en inglés, la cual utiliza un material termoplástico para ser extruido en pequeños hilos que forman las capas sucesivas que finalmente dan forma a partes y componentes [4]. Dentro de las ventajas de este proceso se encuentra la baja necesidad de realizar procesos posteriores a la manufactura, tiempo corto de máquina y la ausencia de tiempos de espera por curado de resina. Dentro de las desventajas del proceso se puede observar la baja resolución en el eje vertical en comparación con otros procesos, aunque nuevas tecnologías y equipos de impresión modernos han disminuido estas desventajas [5], [6].

Estas ventajas considerables sobre otros tipos de manufactura han permitido que esta técnica se extienda rápidamente a diferentes campos de aplicación. Por ejemplo, las aplicaciones biomédicas han impulsado el uso de la impresión 3D de forma exponencial debido a su capacidad de producir elementos de alta complejidad que se ajustan al cuerpo humano y la capacidad de producir piezas personalizadas a las formas particulares de cada individuo sin necesidad de tener que producir grandes cantidades. Partes y estructuras como implantes, órtesis y prótesis son algunos ejemplos de las aplicaciones en este medio [7] – [9]. Otro campo de aplicación que ha impulsado el uso de la tecnología de impresión 3D es el aeroespacial. Dado los requerimientos de geometría compleja, disminución de peso

¹ dagudelo@usbbog.edu.co

² drdiaz@academia.usbbog.edu.co

³ aibarra@academia.usbbog.edu.co

⁴ ccruel@academia.usbbog.edu.co

⁵ miguel.montoyav@escuelaing.edu.co

⁶ camilo.hernandez@escuelaing.edu.co

y partes especializadas de baja producción en masa de los componentes usados en este campo facilitan su producción mediante técnicas de manufactura aditiva. Componentes como alabes, partes de aeronaves no tripuladas, perfiles aerodinámicos, etc., hacen parte de los componentes de la industria aeronáutica que son producidos mediante impresión 3D [10], [11]. Otros campos que también se podrían mencionar que hacen uso de las ventajas de esta tecnología son la construcción, arquitectura, partes de consumo e inclusive la educación [12], [13].

Este gran número de posibles aplicaciones de la manufactura aditiva en diferentes ramas de la ingeniería ha impulsado el uso de un gran número de tipos materiales que pueden ser procesados mediante esta técnica, pasando por materiales compuestos de matriz polimérica [14], [15], metales y aleaciones de gran resistencia [16], [17] y llegando hasta concreto [18], [19] y cerámicos de ingeniería [20] – [22]. Sin embargo, el mayor porcentaje de materiales usados para la manufactura aditiva y en especial para la impresión 3D por deposición de hilo fundido son los polímeros termoplásticos [23]. Así mismo dentro de los polímeros termoplásticos, se destaca el uso de polímeros con un relativo bajo punto de fusión como el ácido poliláctico (PLA), el polietileno (PE) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) [24], [25].

Como se puede observar en el gran número de aplicaciones y materiales que se pueden procesar mediante la manufactura aditiva y en particular usando la técnica de impresión 3D por deposición de hilo fundido, es de gran importancia en la mayoría de casos conocer la respuesta de las estructuras y componentes cuando son sometidos a diferentes tipos de cargas. Sin embargo, el comportamiento mecánico de estas estructuras aún no se ha explorado completamente. Si bien se han realizado investigaciones para determinar las propiedades mecánicas de componentes impresos en 3D [26] – [28], debido al gran número de materiales disponibles y a las infinitas configuraciones posibles de imprimir, este es aún un campo abierto de investigación.

Por lo tanto, en este trabajo se caracterizaron las propiedades mecánicas ortotrópicas de dos materiales termoplásticos impresos en 3D mediante la técnica de deposición fundida de hilo. Los materiales caracterizados son el ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), dos de los materiales más usados en la manufactura aditiva de polímeros debido a sus propiedades físicas y mecánicas que facilitan el uso en un sinnúmero de aplicaciones. La caracterización mecánica se realizó asumiendo un comportamiento ortotrópico de las estructuras impresas en 3D. Es decir, se asumió que la respuesta mecánica es dependiente de la dirección de aplicación de la carga relativa a la dirección de impresión del material. En consecuencia, se realizó un estudio experimental sometiendo probetas impresas con diferentes configuraciones en ambos materiales a tensión bajo el estándar ASTM D3039. Se manufacturaron y ensayaron probetas con dirección de impresión axial a la dirección de carga y probetas con dirección de impresión transversal a la dirección de carga para determinar las propiedades elásticas y plásticas en ambas direcciones. Mediante un análisis estadístico se determinaron los módulos de elasticidad, los esfuerzos de fluencia, las resistencias a tensión y las deformaciones de fractura en ambas direcciones para el PLA y el ABS.

2. MÉTODO

Se realizó la caracterización mecánica cuasiestática para determinar el comportamiento mecánico a través de la estimación de las propiedades elásticas y plásticas a tensión de estructuras impresas en 3D de dos materiales termoplásticos, el PLA y el ABS. Se asumió un comportamiento ortotrópico de las estructuras manufacturadas bajo la técnica de modelamiento por deposición fundida de hilo, en consecuencia, se implementó un procedimiento experimental, que se describe a continuación, para determinar las propiedades mecánicas en dos direcciones de carga.

2.1 Características de los especímenes

Con el fin de determinar el comportamiento mecánico de estructuras impresas en polímeros termoplásticos de PLA y ABS, se diseñó un procedimiento experimental con ensayos a tensión que permite encontrar las propiedades mecánicas ortotrópicas del material impreso en 3D. Debido a que el proceso de manufactura por deposición fundida se realiza aplicando delgados filamentos de material fundido y extruido en direcciones específicas capa por capa, la estructura final posee propiedades mecánicas direccionadas de acuerdo a la dirección de deposición del material. Por este motivo, en este trabajo se determinaron las propiedades elásticas y plásticas en dos direcciones como se muestra en la Figura 1: 1 dirección axial de aplicación del material y 2 dirección transversal a la aplicación del material.

Se realizaron ensayos a tensión de acuerdo al estándar ASTM D3039 [30] para determinar las propiedades mecánicas de ambos materiales impresos en 3D. Este estándar fue seleccionado debido a que se desean determinar las propiedades ortotrópicas del material impreso debido a que las direcciones de impresión afectan la direccionalidad de las propiedades mecánicas finales. Especímenes rectangulares rectos con sección transversal constante y dimensiones de 250 mm x 20 mm y espesor de 2,0 mm fueron manufacturados de acuerdo al estándar seleccionado.

Dos tipos diferentes de probetas para cada tipo de material fueron manufacturadas en capas depositadas a diferentes ángulos, emulando la configuración de un laminado de materiales compuestos de matriz polimérica con propiedades unidireccionales. Probetas simétricas y balanceadas se probaron a tensión para cada una de las configuraciones. La

primera configuración probada consiste en una impresión con configuración $[0^\circ/0^\circ]$ para determinar las propiedades mecánicas en dirección axial. Esta configuración significa que se imprimieron dos capas de material polimérico con dirección de deposición del hilo fundido en dirección longitudinal a la dirección a la dirección de carga. También se probaron probetas con configuración $[90^\circ/90^\circ]$ para determinar las propiedades en dirección transversal del material. Estas probetas se manufacturaron con dirección de impresión transversal a la dirección de carga. En la Figura 2 se muestran los ejemplos de las probetas para ambas configuraciones, donde las líneas muestran la dirección de deposición del hilo fundido.

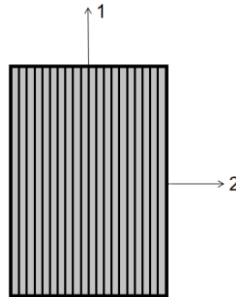


Figura 1. Definición de las direcciones principales de una lámina ortotrópica impresa en 3D [29]: 1 Dirección axial a la dirección de impresión. 2 Dirección transversal a la dirección de impresión.

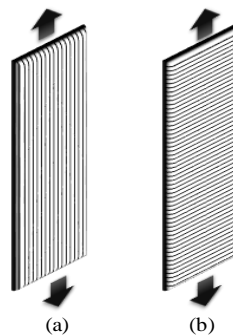


Figura 2. Dirección de impresión de probetas impresas en 3D: (a) Dirección axial $[0^\circ/0^\circ]$. (b) Dirección transversal $[90^\circ/90^\circ]$

Una máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X con celda de carga de 10 kN y aplicando una velocidad de cabezal constante de 2 mm/min fue usada para probar 10 probetas de cada una de las configuraciones establecidas. Mediante un análisis estadístico se determinaron las propiedades mecánicas promedio de los materiales PLA y ABS. Se determinaron para ambos materiales los módulos de elasticidad en ambas direcciones (E_1 , E_2), los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones (S_{y1} , S_{y2}), las resistencias a tensión (X_1 , X_2) y las deformaciones de fractura en ambas direcciones (ϵ_1 , ϵ_2).

Durante una etapa de pre-experimentación realizada se encontró que las probetas impresas presentan dos posibles inconformidades durante el ensayo de tensión. Si se aprieta mucho las mordazas de sujeción, estas inducen falla en la región de agarre generando rechazo de la prueba; o, por el contrario, si no se aprieta suficientemente las mordazas para evitar falla en la región de agarre existe deslizamiento entre la mordaza y la probeta, obteniendo resultados incorrectos en la curva esfuerzo-deformación. Por este motivo se implementaron *tabs* en la región de agarre para evitar el deslizamiento y garantizar una transmisión de carga más uniforme y evitar rupturas indeseadas de los especímenes de prueba. Se manufacturaron *tabs* de madera de balsa de acuerdo a la geometría recomendada en estándar ASTM y se fijaron a las probetas usando un adhesivo estructural. La implementación de estos *tabs* permitió un mejor agarre entre las mordazas y los especímenes, eliminando la falla por mordazas y el deslizamiento entre las probetas y las muelas de agarre.

2.2 Fabricación de los especímenes

Probetas de PLA y ABS fueron manufacturadas de acuerdo a las configuraciones descritas anteriormente. Una impresora 3D Flash Forge Creator Pro de deposición de hilo fundido se usó para manufacturar las probetas usando PLA [31] y ABS [32] del fabricante Prusament. El proceso de fabricación de las probetas contempló varias etapas: diseño en computador, donde se digitalizó la geometría para cumplir con los estándares de la norma seleccionada; generación de códigos de impresión, que incluyó la conversión del modelo digital al lenguaje interpretado por la máquina de impresión 3D; configuración de la impresión, etapa en la cual se definieron los parámetros como la temperatura de la cama de impresión y del extrusor, el tipo de material y la velocidad de deposición de material; manufactura, proceso mediante el cual el material termoplástico fue fundido en el extrusor y depositado en una orientación específica; remoción y post procesamiento, proceso en el cual se verificó el conformado de la parte, así como sus dimensiones

exteriores con el fin de comprobar si resultó apta para ser sometida a pruebas. Para tal fin, se aplicó un protocolo de inspección visual, con el fin de determinar si cumple o no con los parámetros establecidos de control de calidad.

A partir de las pruebas realizadas previamente y teniendo en cuenta la conformación y acabado de las probetas obtenidas, se determinaron las temperaturas en el extrusor para la impresión del PLA de 220°C y 250°C para el ABS. Temperaturas que se encuentran dentro de los rangos sugeridos por el fabricante, permitiendo la fundición completa del material y presentando una adecuada adherencia entre cada una de las capas de material y entre el material y la plataforma de impresión. Igualmente, se determinó la temperatura más adecuada de la plataforma de impresión para garantizar la adherencia de los materiales a la cama. Para el PLA se determinó una temperatura de 70°C de temperatura de la plataforma mientras que para el ABS se determinó una temperatura de 110°C. Además, para el ABS, debido a sus propiedades durante la impresión, fue necesario usar cama magnética flexible desmontable con el fin de facilitar el posterior retiro de las piezas debido a la fuerte adherencia de la probeta a la cama de impresión durante el proceso de manufactura. También se configuró para la impresión de ambos materiales la altura de capa. Esta se fijó en 0,27 mm para asegurar la adhesión adecuada entre capas sucesivas.

2.3 Determinación de las propiedades mecánicas

- **Módulo de elasticidad.** El módulo de elasticidad (E) o módulo de Young, es uno de las propiedades mecánicas más importantes para el diseño de estructuras pues este determina la rigidez del material cuando es sometido a cargas. Este parámetro se determina mediante el cálculo de la pendiente de la recta que une dos puntos seleccionados en la región elástica lineal del material como se muestra en la Figura 3.

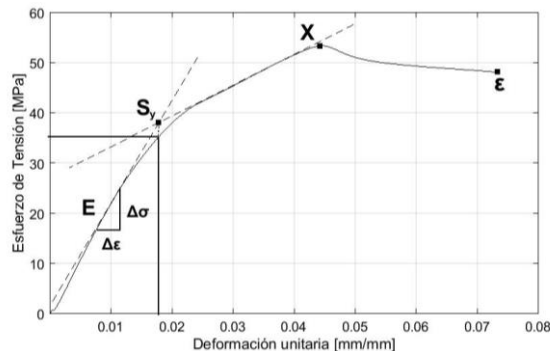


Figura 3. Determinación de las propiedades mecánicas en la curva esfuerzo deformación

- **Esfuerzo de fluencia.** El esfuerzo de fluencia (S_y) o punto de transición es un parámetro importante de los materiales termoplásticos pues indica el esfuerzo en el cual el material pasa de una fase elástica a una plástica. El esfuerzo de fluencia se calculó de forma gráfica siguiendo el procedimiento mostrado en la Figura 3. Se dibuja una línea tangente a la recta que describe la zona elástica del material, así mismo, se traza una línea tangente a la zona plástica del material; el punto de intersección de ambas líneas tangentes marca el punto de transición de la zona elástica a la zona plástica.
- **Resistencia a la tensión.** La resistencia a la tensión (X) o esfuerzo máximo, describe la máxima capacidad de soportar carga del material. Este se identifica en la curva esfuerzo-deformación, como se muestra en la Figura 3, en el punto de esfuerzo máximo de la curva.
- **Deformación de fractura.** La deformación de fractura (ϵ) o deformación última describe el punto de deformación máxima de capacidad de carga del material. Este punto se identifica en la curva esfuerzo-deformación, como se muestra en la Figura 3, como el punto máximo de deformación donde el material se rompe y no tiene capacidad estructural.

3. RESULTADOS

Las propiedades mecánicas ortotrópicas a tensión del PLA y ABS impresos 3D mediante la técnica modelado por deposición fundida, se determinaron mediante ensayos a tensión en diferentes configuraciones. A continuación, se muestran los resultados experimentales de la caracterización mecánica de ambos materiales.

3.1 Propiedades mecánicas del PLA impreso en 3D

A continuación, se presentan los resultados registrados después de someter a pruebas de tensión cada uno de los especímenes de las dos diferentes orientaciones de impresión en material PLA. Las Figuras 4 y 5 muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para el PLA impreso en 3D sometido a cargas de tensión en la dirección axial, configuración $[0^\circ/0^\circ]$, y transversal, configuración $[90^\circ/90^\circ]$, respectivamente.

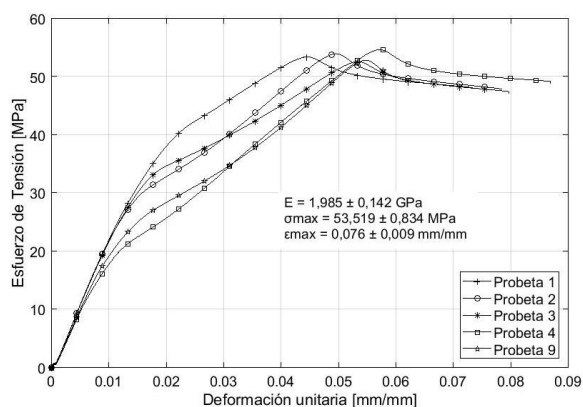


Figura 4. Curvas esfuerzo – deformación en dirección axial. PLA [0°/0°]

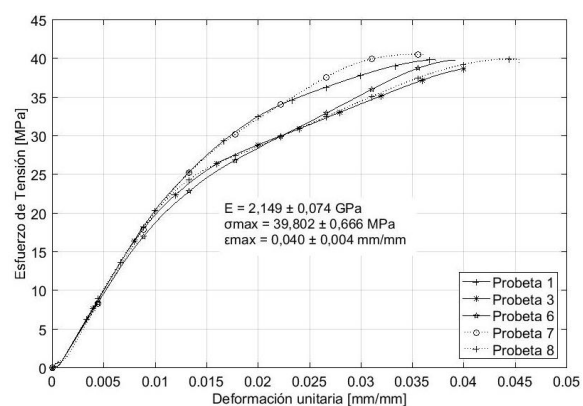


Figura 5. Curvas esfuerzo – deformación en dirección transversal. PLA [90°/90°]

En las gráficas se puede observar una dispersión significativa en las curvas de esfuerzo de tensión. Esta variación es propia de este tipo de manufactura aditiva que depende de muchos factores que las máquinas de impresión pueden variar durante el proceso de impresión, como velocidad de impresión, temperatura de extrusión, entre otras, lo que conlleva a que la consistencia de la estructura pueda presentar algunas variaciones en sus propiedades mecánicas. Para las probetas en dirección axial [0°/0°] se puede observar un comportamiento mecánico inicialmente elástico lineal, seguido de una transición a una región plástica de endurecimiento hasta un esfuerzo máximo a tensión. Por último, se observa un ablandamiento del material hasta su ruptura final. Comportamiento típico de un material termoplástico sometido a cargas de tensión axial.

Similarmente, las probetas en dirección transversal a la dirección de impresión [90°/90°] también muestran un comportamiento elástico lineal inicial y un endurecimiento plástico posterior. Sin embargo, y en contraste con los ensayos en dirección axial, estas curvas esfuerzo-deformación presentan una ruptura súbita aún sin alcanzar el esfuerzo máximo que puede alcanzar el PLA termoplástico. La estructura impresa no presenta un ablandamiento final mostrando una separación de las capas. Esta diferencia en los modos de falla en ambas direcciones se da debido a que en la dirección transversal se presenta una desadhesión de los hilos de impresión remanentes del proceso 3D mientras que en la dirección axial se observa el comportamiento y capacidad de carga de los materiales del PLA.

En la Tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas ortotrópicas de láminas impresas en 3D en PLA mediante la técnica de modelamiento por deposición fundida. Se presentan las propiedades en dirección 1, axial a la dirección de impresión, y 2, transversal a la dirección de impresión. Se muestra el promedio de los módulos de elasticidad en ambas direcciones (E_1 , E_2), los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones (S_{y1} , S_{y2}), las resistencias a tensión (X_1 , X_2) y las deformaciones de fractura en ambas direcciones (ϵ_1 , ϵ_2). Adicionalmente, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de las muestras analizadas.

Tabla 1. Propiedades mecánicas ortotrópicas de PLA impreso en 3D por deposición fundida

Propiedad	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	S_{y1} [MPa]	S_{y2} [MPa]	X_1 [MPa]	X_2 [MPa]	ϵ_1 [mm/mm]	ϵ_2 [mm/mm]
Promedio	1,98	2,15	26,19	22,90	53,51	39,80	0,076	0,040
Desv. Est.	0,14	0,07	7,78	2,67	0,83	0,67	0,009	0,004
Coef. de var. (%)	7,13	3,43	29,71	11,66	1,56	1,67	12,182	9,064

Un análisis del resultado de las propiedades mecánicas muestra que el comportamiento mecánico de las láminas de PLA impresas en 3D es ortotrópico, es decir, que su comportamiento axial es diferente a su comportamiento transversal. Si bien el comportamiento elástico no es significativamente diferente en ambas direcciones, su

comportamiento plástico si difiere dependiendo de la dirección de medición. Esta diferencia alcanza una reducción de hasta el 74% en la resistencia a la tensión transversal en comparación la resistencia axial. Diferencia que se puede explicar debido al tipo de falla que presenta cada una de las configuraciones. Mientras que en las probetas falladas en dirección axial $[0^\circ/0^\circ]$ la falla predominante es ruptura de fibras poliméricas a tensión, en las probetas falladas en dirección transversal $[90^\circ/90^\circ]$ se observa declamación entre las capas de material depositado.

Cabe resaltar que para el cálculo de las propiedades se descartaron algunas probetas con base al intervalo de confianza. Este intervalo fue calculado con el promedio simple, la desviación estándar de la resistencia a tensión y aplicando un grado de confianza del 98%. En consecuencia, probetas que presentaron propiedades mecánicas fuera de este intervalo de confianza fueron descartadas para el cálculo del promedio. No obstante, en ninguno de los dos casos se descartaron tantas probetas como para no cumplir con el mínimo de probetas exigido por el estándar; en ambos casos se mantuvo un mínimo de cinco probetas analizadas estadísticamente para el cálculo de las propiedades mecánicas. De la configuración $[0^\circ/0^\circ]$ se sometieron a pruebas de tensión 10 especímenes. De estos, tres fueron descartados ya que presentaron deslizamiento en las mordazas, aún bajo la implementación de *tabs* de madera en la sujeción; dos se descartaron debido a que sus propiedades mecánicas se encuentran fuera del intervalo de confianza. La norma ASTM implementada requiere de al menos 5 pruebas exitosas para considerar los resultados obtenidos como válidos, cumpliendo satisfactoriamente con este requisito. Para la configuración $[90^\circ/90^\circ]$, también se sometieron a prueba 10 especímenes. Todos los ensayos fueron catalogados como válidos debido a que no presentaron fallas en las mordazas y las probetas fallaron a lo largo de la zona comprendida entre ambos soportes. Del lote sometido a pruebas, se descartaron 5 probetas debido a que no se encontraban dentro del intervalo de confianza identificado en los ensayos.

3.2 Propiedades mecánicas del ABS impreso en 3D

A continuación, se presentan los resultados registrados después de someter a pruebas de tensión cada uno de los especímenes de las dos diferentes orientaciones de impresión en material ABS. Las Figuras 6 y 7 muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para el ABS impreso en 3D sometido a cargas de tensión en la dirección axial $[0^\circ/0^\circ]$ y transversal $[90^\circ/90^\circ]$ respectivamente. A diferencia del PLA impreso, en este caso se observan curvas esfuerzo deformación agrupadas y siguiendo la misma tendencia. Esto quiere decir que el ABS impreso presenta menos variación en sus propiedades mecánicas atribuidas a que su manufactura es un poco más estable que la del PLA. Para las probetas en dirección axial $[0^\circ/0^\circ]$ se puede observar un comportamiento mecánico inicialmente elástico lineal, seguido de una transición a una región plástica de endurecimiento hasta un esfuerzo máximo a tensión. Por último, se observa un ablandamiento del material hasta su ruptura final. Sin embargo, la deformación final de fractura si mostró una variación significativa. Similarmente, las probetas en dirección transversal $[90^\circ/90^\circ]$ también muestran un comportamiento elástico lineal inicial y un endurecimiento plástico posterior muy corto sin ablandamiento final y una ruptura súbita después de alcanzar su resistencia máxima a la tensión. Esta diferencia en los modos de falla en ambas direcciones se da debido a que en la dirección trasversal se presenta una desadhesión de los hilos de impresión remanentes del proceso 3D.

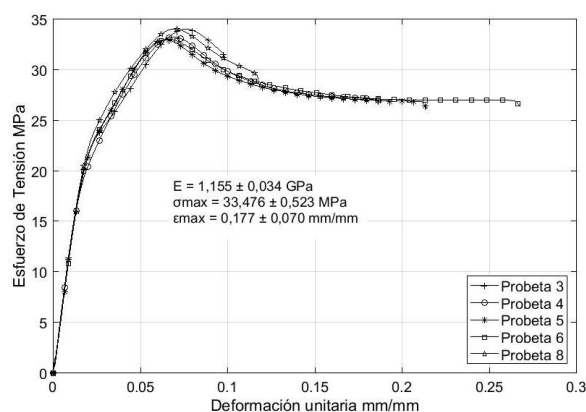


Figura 6. Curvas esfuerzo – deformación en dirección axial. ABS $[0^\circ/0^\circ]$

En la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas ortotrópicas de láminas impresas en 3D en ABS mediante la técnica de modelamiento por deposición fundida. Se presentan las propiedades en dirección 1, axial a la dirección de impresión, y 2, transversal a la dirección de impresión. Se muestra el promedio de los módulos de elasticidad en ambas direcciones (E_1 , E_2), los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones (S_{y1} , S_{y2}), las resistencias a tensión (X_1 , X_2) y las deformaciones de fractura en ambas direcciones (ϵ_1 , ϵ_2). Adicionalmente, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de las muestras analizadas.

Un análisis del resultado de las propiedades mecánicas muestra que el comportamiento mecánico de las láminas de ABS impresas en 3D es ortotrópico, es decir, que su comportamiento axial es diferente a su comportamiento

transversal. Si bien el comportamiento elástico no es significativamente diferente en ambas direcciones, su comportamiento plástico si difiere dependiendo de la dirección de medición. Esta diferencia alcanza una reducción de hasta el 42% en la resistencia a la tensión transversal en comparación la resistencia axial. Diferencia que se puede explicar debido al tipo de falla que presenta cada una de las configuraciones. Mientras que en las probetas falladas en dirección axial [0°/0°] la falla predominante es ruptura de fibras poliméricas a tensión, en las probetas falladas en dirección transversal [90°/90°] se observa declamación entre las capas de material depositado.

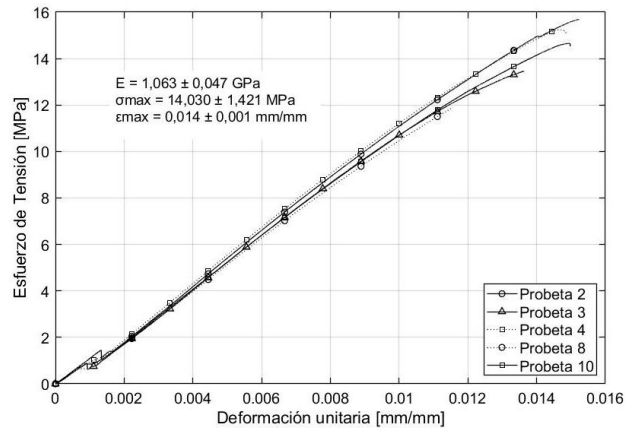


Figura 7. Curvas esfuerzo – deformación en dirección axial. ABS [90°/90°]

Tabla 2. Propiedades mecánicas ortotrópicas de ABS impreso en 3D por deposición fundida

Propiedad	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	S_{y1} [MPa]	S_{y2} [MPa]	X_1 [MPa]	X_2 [MPa]	ϵ_1 [mm/mm]	ϵ_2 [mm/mm]
Promedio	1,16	1,06	23,20	13,38	33,48	14,03	0,177	0,014
Desv. Est.	0,03	0,05	0,69	1,33	0,52	1,42	0,070	0,001
Coef. de var. (%)	2,98	4,41	2,98	9,97	1,56	10,79	39,309	10,815

Para la configuración ABS [0°/0°] se fabricaron y sometieron a pruebas de tensión 10 probetas. Del total de especímenes ensayados, tres presentaron falla por deslizamiento en la mordaza y dos más fueron descartadas debido a que se encontraban por fuera del intervalo de confianza determinado. Por otra parte, para la configuración [90°/90°], se sometieron a pruebas de tensión un total de 10 probetas de la configuración. No existió falla alguna durante el ensayo mecánico para la totalidad de las muestras. Aplicando el intervalo de confianza, se descartaron 5 probetas debido a que los valores de esfuerzo máximo se encuentran por fuera del rango establecido.

4. DISCUSIÓN

A partir de los resultados experimentales de las pruebas a tensión de probetas impresas en 3D mediante la técnica de deposición por hilo fundido y usando dos direcciones de impresiones diferentes, axiales y transversales, se encontraron los siguientes aspectos.

4.1 Comparación de métodos para calcular el módulo de elasticidad

En la literatura, y especialmente en los estándares se encuentran varios métodos para calcular el módulo de elasticidad de diferentes materiales sin existir un método preferido para materiales impresos 3D mediante la técnica de deposición de hilo fundido. Por esta razón, en esta sección se realiza una comparación de los métodos propuestos en la normativa ASTM. Como línea base se toma el método sugerido por el estándar ASTM D 3039 [30] usado en este trabajo y se compara con los dos métodos propuestos por el estándar ASTM E111 [33]. En este estándar se sugiere aplicar un método de regresión por mínimos cuadrados (Método A) a la nube de puntos adquirida sobre la región elástica y un segundo método aritmético para calcular la pendiente de la recta tomado dos puntos sobre la región elástica del material (Método B).

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los módulos de elasticidad axial (E_1) y transversal (E_2) para el PLA y el ABS calculados usando los tres métodos sugeridos por las normas ASTM. Así mismo, se muestra el porcentaje de error para cada método tomando como línea base los resultados obtenidos al aplicar el método del estándar ASTM D3039. Al comparar los resultados obtenidos por los tres métodos se observa que el error del módulo de elasticidad del Método B del estándar ASTM E111 en comparación con el estándar ASTM D3039 es cero. Es decir, los resultados de ambos métodos son iguales sin encontrar diferencias entre los mismos. Sin embargo, al aplicar el método A del estándar ASTM E111 se encontraron errores significativos que pueden llegar hasta 14,7%. Este porcentaje de error se evidencia especialmente en el cálculo de los módulos de elasticidad del ABS debido a que la zona de transición elástica-plástica de este material no se marca claramente, en consecuencia, la cantidad de puntos seleccionados para

realizar la regresión lineal puede afectar los resultados de forma significativa. Mientras que para los dos otros métodos la selección de puntos que claramente se identifiquen en la zona elástica del material facilita el proceso de cálculo.

Tabla 3. Comparación de métodos de cálculo para el módulo de elasticidad

	ASTM D3039 [GPa]	ASTM E111 Método A [GPa]	Error (%)	ASTM E111 Método B [GPa]	Error (%)
PLA E_1	1,98	1,98	0,0	1,99	0,5
PLA E_2	2,15	2,28	6,0	2,15	0,0
ABS E_1	1,16	1,33	14,7	1,16	0,0
ABS E_2	1,06	1,18	11,3	1,06	0,0

4.2 Comparación de materiales PLA y ABS

Se realizó una comparación de las propiedades mecánicas de ambos materiales probados. En la Figura 8 se muestra una comparación entre las propiedades elásticas de los dos materiales ensayados en este trabajo, PLA y ABS impresos en 3D mediante deposición de hilo fundido. En la figura se puede observar la comparación de los módulos elásticos axial (E_1) y transversal (E_2) para ambos materiales. Se puede observar que ambos materiales en términos de sus propiedades elásticas son isotrópicos, es decir no existe diferencia significativa entre el módulo de elasticidad en dirección 1 axial a la dirección de impresión y el módulo de elasticidad en dirección 2 transversal a la dirección de impresión. En cuanto a la comparación entre ambos materiales, se puede observar que el PLA es un material más rígido que el ABS. Este presenta un módulo de elasticidad 1,7 veces mayor en la dirección axial y 2,0 veces mayor en la dirección transversal.

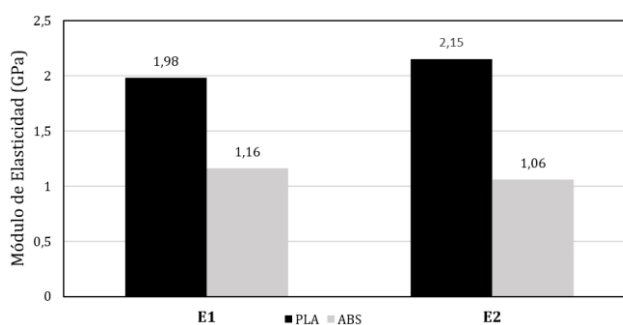


Figura 8. Comparación de módulos de elasticidad de materiales impresos en 3D. PLA y ABS

Asimismo, se compararon las propiedades plásticas de ambos materiales obteniendo resultados diferentes contrastados con sus propiedades elásticas. La Figura 9 muestra la comparación de las resistencias a la tensión de ambos materiales en las dos direcciones de prueba, axial y transversal. Al comparar la resistencia a la tensión axial (X_1) con respecto a la resistencia a la tensión transversal (X_2) se puede observar que ambos materiales presentan un comportamiento mecánico ortotrópico, con valores de esfuerzo mayores en la dirección longitudinal a la dirección de impresión. El PLA presenta una resistencia 34% mayor en dirección longitudinal, mientras que el ABS presenta un aumento del 138% de la resistencia a la tensión en dirección longitudinal. La disminución considerable de la resistencia a la tensión en dirección transversal se debe a la baja adhesión que presentan los hilos fundidos uno al lado del otro dominando el modo de falla la delaminación de los hilos extruidos. Por el contrario, en la dirección longitudinal a la dirección de impresión el modo de falla se observa un comportamiento dúctil característico de un polímero termoplástico y dominando esta propiedad la resistencia mecánica del polímero extruido.

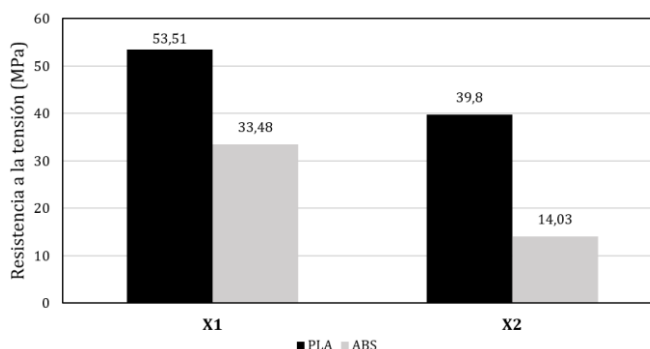


Figura 9. Comparación de resistencias a la tensión de materiales impresos en 3D. PLA y ABS

Por otra parte, también se puede observar que el PLA es un material más resistente a la tensión que el ABS. En dirección longitudinal el PLA es 37% más resistente que ABS y en dirección transversal el PLA es 64% más resistente

a tensión que el ABS. Resultados esperados y consistentes con las propiedades mecánicas de ambos polímeros en su estado extruido. Igualmente, en la Figura 10 se puede observar la comparación del esfuerzo de fluencia del PLA y el ABS impresos en 3D en las dos direcciones probadas, axial y transversal. Para ambos materiales, el esfuerzo de fluencia presenta un valor más elevado en la dirección axial (S_{y1}) con respecto a su dirección transversal (S_{y2}). Sin embargo, esta diferencia es solo del 12,5% para el caso del PLA mientras que para el ABS esta diferencia es del 42,3% mostrando un comportamiento ortotrópico más marcado. Al igual que con las otras dos propiedades mecánicas analizadas anteriormente, módulo de elasticidad y resistencia a la tensión, el esfuerzo de fluencia de ambos materiales es diferente; siendo el esfuerzo de fluencia del PLA mayor que el del ABS. En dirección longitudinal el PLA posee un esfuerzo de fluencia 11% mayor que el ABS y en dirección transversal el PLA posee un esfuerzo de fluencia 41% mayor que el ABS.

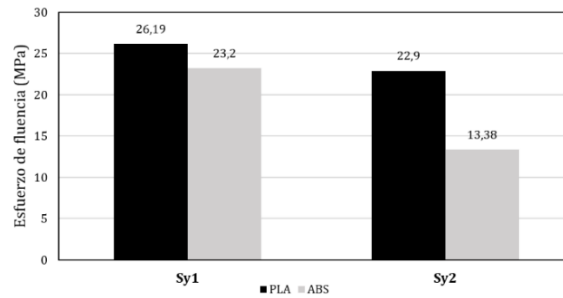


Figura 1037. Comparación del esfuerzo de fluencia de materiales impresos en 3D. PLA y ABS

Por último, se analizó el comportamiento de la deformación de ruptura de ambos materiales impresos en 3D. Para esta propiedad se observó también que ambos materiales poseen un comportamiento ortotrópico, es decir, su comportamiento en la dirección de impresión es significativamente diferente que su comportamiento en la dirección transversal a la dirección de impresión. Por ejemplo, el PLA muestra una deformación de ruptura en dirección axial (ϵ_1) 47% mayor en comparación con la dirección transversal (ϵ_2); y el ABS muestra una deformación de ruptura en dirección axial 92% mayor en comparación con la dirección transversal, como se presenta en la Figura 11.

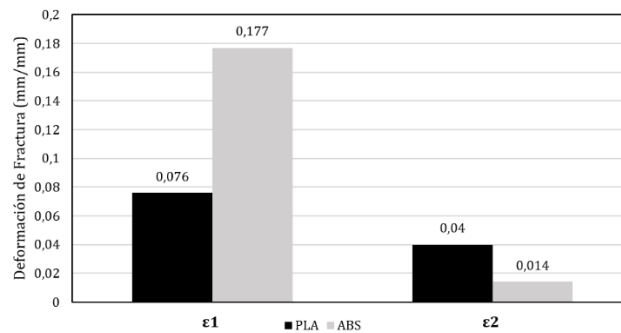


Figura 11. Comparación de la deformación de fractura de materiales impresos en 3D. PLA y ABS

En contraste con las otras propiedades mecánicas, el ABS muestra una deformación de ruptura mayor que el PLA en dirección axial a la impresión de las fibras. Esto se debe a que el polímero termoplástico extruido de ABS presenta una mayor ductilidad que el PLA extruido que usualmente es frágil. No obstante, en la dirección transversal a la dirección de impresión la deformación de ruptura es menor en el ABS que el PLA. Esto se debe a que, para esta dirección de carga, las propiedades del polímero extruido no dominan el modo de falla de la probeta; en esta dirección transversal domina la falla a tensión la adhesión de las capas impresas en 3D.

5. CONCLUSIONES

Se determinaron las propiedades mecánicas ortotrópicas a tensión de dos materiales, ABS y PLA, impresos en 3D mediante la técnica de modelado por deposición fundida. Se usó el estándar ASTM D3039, para caracterización a tensión de materiales compuestos, para caracterizar las probetas impresas debido a que las propiedades del material impreso en 3D se asemejan a un material compuesto polimérico reforzado con propiedades unidireccionales. Se determinaron las propiedades en dirección 1, axial a la dirección de impresión, y las propiedades en dirección 2, transversal a la dirección de impresión. Se encontraron los módulos de elasticidad en ambas direcciones (E_1 , E_2), los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones (S_{y1} , S_{y2}), las resistencias a tensión en ambas direcciones (X_1 , X_2) y las deformaciones de fractura en ambas direcciones (ϵ_1 , ϵ_2) para ambos materiales de estudio.

Los resultados experimentales de las pruebas a tensión demostraron que los materiales impresos en 3D mediante deposición de hilo fundido presentan propiedades mecánicas ortotrópicas que dependen de la dirección de impresión de las fibras. Si bien las propiedades elásticas no presentan diferencias significativas en ambas direcciones, las

propiedades plásticas y la resistencia máximas si son significativamente diferentes. Se encontró una reducción de hasta el 74% de la resistencia a la tensión en la dirección transversal en comparación con la dirección axial a la dirección de impresión para el PLA y una reducción del 42% para el ABS. Esta diferencia en la resistencia máxima a tensión se debe a la diferencia en el modo de falla en ambas direcciones. Mientras que en la dirección axial se observó una falla típica dúctil y posterior de fractura a tensión de polímeros termoplásticos, en la dirección transversal por el contrario se observó una delaminación entre capas impresas del material.

En comparación de los dos materiales impresos en 3D caracterizados mecánicamente, el PLA presentó propiedades superiores sobre el ABS. El módulo de elasticidad en dirección axial para el PLA es de 1,98 GPa mientras que para el ABS es de 1,16 GPa; y la resistencia a la tensión en dirección axial para el PLA es de 53,51 MPa y 33,48 MPa para el ABS.

La caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales impresos en 3D es fundamental para poder obtener diseños de estructuras confiables y poder realizar simulaciones bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados de este trabajo aportan una porción considerable en el camino de implementar modelos completos del comportamiento de este tipo de materiales, sin embargo, es necesario caracterizar las propiedades mecánicas en otras condiciones de carga como cortante, delaminación entre capas, compresión, entre otros, con el fin de implementar modelos constitutivos completos de los materiales impresos en 3D.

REFERENCIAS

- [1] Sood, R. Ohdar y S. Mahapatra, «Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement,» *Journal of Advance Research*, vol. 3, n° 1, pp. 81-90, 2 Junio 2011.
- [2] K. V. Wong y A. Hernandez, «A Review of Additive Manufacturing,» *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, p. 10, 2012.
- [3] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. Nguyen y D. Hui, «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [4] G. Cicala, A. Latteri, B. Del Curto, A. Lo Russo, G. Recca and S. Fare, "Engineering thermoplastics for additive manufacturing: a critical perspective with experimental evidence to support functional applications," *JABFM*, p. 9, 2017.
- [5] K. Chua, K. F. Leong y C. S. Lim, *Rapid prototyping: principles and applications*, World Scientific Publishing Company, 2010.
- [6] K. Cooper, *Rapid prototyping technology: selection and application*, CRC Press, 2001.
- [7] L. Ventola, «Medical applications for 3D printing: current and projected uses,» *Pharmacy and Therapeutics*, vol. 39, n° 10, p. 704, 2014.
- [8] «Rengier, Fabian; Mehndiratta, Amit; Von Tengg-Koblighk, Hendrik; Zechmann, Christian M; Unterhinninghofen, Roland; Kauczor, H-U; Giesel, Frederik L,» *International journal of computer assisted radiology and surgery*, vol. 5, n° 4, pp. 335-341, 2010.
- [9] H. Dodziuk, «Applications of 3D printing in healthcare,» *Polish journal of cardio-thoracic surgery*, vol. 13, n° 3, p. 283, 2016.
- [10] B. Lu, D. Li y X. Tian, «Development trends in additive manufacturing and 3D printing,» *Engineering*, vol. 1, n° 1, pp. 85-89, 2015.
- [11] S. C. Joshi y A. A. Sheikh, «3D printing in aerospace and its long-term sustainability,» *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, n° 4, pp. 175-185, 2015.
- [12] B. Berman, «3-D printing: The new industrial revolution,» *Business horizons*, vol. 55, n° 2, pp. 155-162, 2012.
- [13] Canessa, C. Fonda, M. Zennaro y N. Deadline, «Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development,» *Low-Cost 3D Printing*, vol. 11, 2013.
- [14] B. G. Compton y J. A. Lewis, «3D-printing of lightweight cellular composites,» *Advanced materials*, vol. 26, n° 34, pp. 5930-5935, 2014.
- [15] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou y D. Hui, «3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, pp. 442-458, 2017.
- [16] J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler y T. M. Pollock, «3D printing of high-strength aluminium alloys,» *Nature*, vol. 549, n° 7672, p. 365, 2017.
- [17] C. W. Visser, R. Pohl, C. Sun, G.-W. Romer, B. Huis in 't Veld y D. Lohse, «Toward 3D printing of pure metals by laser-induced forward transfer,» *Advanced materials*, vol. 27, n° 27, pp. 4087-4092, 2015.
- [18] C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudilliere, J. Dirrenberger y P. Morel, «Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete--a new processing route for architects and builders,» *Materials & Design*, vol. 100, pp. 102-109, 2016.
- [19] Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed y T. Salet, «Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing,» *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, n° 3, pp. 209-225, 2016.
- [20] R. Trombetta, J. A. Inzana, E. M. Schwarz, S. L. Kates y H. A. Awad, «3D printing of calcium phosphate ceramics for bone tissue engineering and drug delivery,» *Annals of biomedical engineering*, vol. 45, n° 1, pp. 23-44, 2017.
- [21] Vorndran, M. Klarner, U. Klammert, L. M. Grover, S. Patel, J. E. Barralet y U. Gbureck, «3D powder printing of beta-tricalcium phosphate ceramics using different strategies,» *Advanced Engineering Materials*, vol. 10, n° 12, pp. B67-B71, 2008.
- [22] C. Minas, D. Carnelli, E. Tervoort y R. Studart, «3D printing of emulsions and foams into hierarchical porous ceramics,» *Advanced Materials*, vol. 28, n° 45, pp. 9993-9999, 2016.
- [23] T. T. Wohlers, *3D Printing and Additive Manufacturing, State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates Incorporated, 2014.
- [24] B. Redwood, F. Schffer y B. Garret, *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*, 3D Hubs, 2017.
- [25] N. G. Tanikella, B. Wittbrodt y J. M. Pearce, «Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing,» *Additive Manufacturing*, vol. 15, pp. 40-47, 2017.
- [26] B. Tymrak, M. Kreiger y J. M. Pearce, «Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions,» *Materials & Design*, vol. 58, pp. 242-246, 2014.

- [27] J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr, Q. Chen y R. C. Advincula, «Mechanical characterization of 3D-printed polymers,» *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 44-67, 2018.
- [28] J. T. Cantrell, S. Rohde, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro, J. Anton, Young, ie, A. Jerez, D. Steinbach, C. Kroese y others, «Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, nº 4, pp. 811-824, 2017.
- [29] D. F. Adams, L. A. Carlsson y R. B. Pipes, *Experimental characterization of advanced composite materials*, CRC Press, 2002.
- [30] ASTM International, *ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM, 2002.
- [31] Prusament, «Green PLA Filament for 3D printing,» [En línea]. Available: <https://shop.prusa3d.com/en/filament/40-green-pla-filament-1kg.html>. [Último acceso: 15 Marzo 2018].
- [32] Prusament, «Blue EasyABS filament for 3D printing,» [En línea]. Available: <https://shop.prusa3d.com/en/filament/57-blue-easyabs-filament-1kg.html>. [Último acceso: 15 Marzo 2018].
- [33] ASTM Internacional, *ASTM E111 Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent modulus, and Chord Modulus*, ASTM, 1997.

Incidencia de las condiciones atmosféricas sobre tecnologías de enfriamiento húmedo y seco para sistemas de refrigeración de centrales de generación de energía

Frank Ortiz G.¹

Andrés F. Colorado G.²

Sergio C. Agudelo F.³

Universidad de Antioquia – Colombia

La adecuada selección de las tecnologías de enfriamiento (mediante torres de enfriamiento secas o húmedas) para las centrales de generación de energía es de vital importancia para garantizar el control de temperatura, la vida útil y la confiabilidad de los equipos mecánicos que disipan calor como: las turbinas, los transformadores de energía, los reguladores de velocidad y los generadores de energía. Las condiciones atmosféricas del sitio donde operaran las tecnologías de enfriamiento afectan el desempeño de los enfriadores de manera significativa. La temperatura del aire, la temperatura de bulbo húmedo, la humedad relativa y la velocidad del viento son algunas de las condiciones ambientales que mayor efecto tienen sobre el desempeño de las tecnologías de enfriamiento. En la actualidad otro tipo de factores como las políticas ambientales, el uso racional de los recursos naturales como el agua y de la energía tienen gran relevancia en las decisiones técnicas para la selección de tecnologías de enfriamiento. Los nuevos criterios, además de buscar un óptimo desempeño de los equipos que componen los sistemas de refrigeración buscan garantizar la protección de los ecosistemas; especialmente en lo relacionado con la conservación de los recursos hídricos.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento poblacional y al desarrollo económico industrial, los requerimientos energéticos de electricidad, combustibles y calor, así como la demanda de recursos naturales han aumentando significativamente en los sectores industrial, transporte y residencial. Una estrategia fundamental para la generación eléctrica eficiente y confiable, es el uso racional y eficiente de los recursos y de la optimización de los procesos de transformación energéticos. Muchos países dependen de sistemas de generación termo-eléctrica cuyos combustibles provienen de fuentes fósiles, nucleares, biomasa y geotérmica.

Estas fuentes de generación representan el 70% de la capacidad instalada a nivel mundial [1]. En las centrales de generación eléctrica comúnmente se utiliza agua de afluentes cercanos para satisfacer las necesidades de refrigeración [1]. La gran mayoría de las plantas de generación de energía resuelven la necesidad de refrigeración mediante torres de enfriamiento secas o húmedas. La eficiencia de estas tecnologías de enfriamiento dependen significativamente de las condiciones atmosféricas, en particular de la humedad relativa local, la temperatura del aire (temperatura de bulbo seco) y correspondiente a la humedad relativa en el aire, la temperatura de bulbo húmedo [1] - [3]. El estudio de Ayoub et. al. indica que las condiciones de aumento de temperatura proyectadas a partir del cambio climático pueden afectar el desempeño térmico de las torres de enfriamiento húmedas y secas [1]. Adicionalmente, el mismo estudio indica que a consecuencia del cambio climático la capacidad de generación de las plantas de energía térmica puede reducirse en un 6.3% en los países de Europa y en más de un 4.4% en los Estados Unidos debido al incremento de temperatura del agua de los lagos y ríos que es aprovechada para los sistemas de refrigeración [1].

Se ha encontrado que el diseño y las condiciones operativas de un aero-enfriador que trabaja bajo el principio de acción indirecta es influenciado principalmente por cambios de las condiciones atmosféricas, tales como cambios en la temperatura del aire y en la humedad relativa, la velocidad del viento, la lluvia, y la radiación solar. Sin embargo, este estudio determinó que la humedad relativa, la temperatura ambiente y la velocidad del viento son las variables que más influyen las condiciones de operación de los aero-enfriadores; [2]. Los vientos tienen un efecto significativo en el diseño térmico de los aero-enfriadores, y pueden reducir la eficiencia de enfriamiento en más de un 30% cuando las velocidades de los vientos son superiores a 10 m/s [2]. Las corrientes de viento a alta velocidad modifican el flujo de diseño de aire a través de la torre, lo que modifica la transferencia de calor y masa en el proceso de enfriamiento evaporativo. El enfriamiento evaporativo se logra al añadir humedad a una corriente de aire, en dicho proceso se aumenta la humedad absoluta (kg_{vapor}/kg_{aire}) mientras se disminuye la temperatura de la corriente de aire.

En años recientes se han desarrollado variaciones a las tecnologías de enfriamiento convencionales. Los aero-enfriadores de acción indirecta o de enfriamiento seco, que consisten de un intercambiador de calor indirecto agua-aire, donde el aire es utilizado para remover el calor del agua. Una de las características principales de las torres de enfriamiento indirecta es la conservación del recurso agua, dado que, al no haber contacto directo entre el agua y el aire, se disminuyen las pérdidas de transferencia de masa de agua al aire, y con ello se reducen los requerimientos de agua de reposición.

Las torres de enfriamiento seco o aero-enfriadores secos son empleadas en regiones áridas debido al significativo ahorro de agua que representa este tipo de tecnología. En estas plantas más del 40% del calor de entrada de la caldera

¹ frank.ortizg@udea.edu.co

² felipe.colorado@udea.edu.co

³ sergio.agudelo@udea.edu.co

típicamente es rechazado por medio de una torre de enfriamiento seco de acción natural (NDDCT) [4]. Estas tecnologías de enfriamiento secas pueden ser mejoradas mediante el aprovechamiento de energía solar (SENDCT) [4]. Esta tecnología se caracteriza por emplear energía solar para incrementar la eficiencia de enfriamiento especialmente cuando la temperatura ambiente es alta. El sistema de torres de enfriamiento está conformado por la torre, un colector solar y un circuito de agua [4].

Las torres de enfriamiento húmedas trabajan bajo el principio de enfriamiento evaporativo para evacuar el calor y son ampliamente utilizadas en sistemas de aire acondicionado, en procesos de refrigeración industrial y en centrales de generación de energía [5] - [6]. El principio de operación de las torres de enfriamiento de acción evaporativa está basado en la transferencia de calor y de masa que se presenta entre el aire del ambiente y el agua caliente de retorno de los sistemas que son refrigerados. Las torres de enfriamiento emplean un sistema de distribución de agua con boquillas tipo spray que realizan la dosificación en la parte superior de la torre, a través de la cual circula una corriente de aire. Dependiendo de la velocidad del aire se realiza la aspersión de agua [5] - [7]. Las torres de enfriamiento evaporativo pueden operar por convección forzada o natural y también pueden trabajar en contraflujo, flujo cruzado o en una combinación de estos [6] - [8]. Dentro de los tipos de torres de enfriamiento las más utilizadas son las torres de tiro natural y las torres con ventilación mecánica o de inducción. Las torres de enfriamiento en algunas ocasiones pueden estar largos periodos de tiempo con el agua estancada, por lo que este tipo de tecnología requiere del uso de tratamientos químicos periódicos antes de su puesta en operación para evitar problemas de formación de bacterias como la Legionela [6].

Otro tipo de torre de enfriamiento son los enfriadores adiabáticos, los cuales son una alternativa para sustituir las torres de enfriamiento evaporativa; a pesar de que ambas tecnologías trabajan bajo el principio de acción evaporativa directa, los enfriadores adiabáticos presentan un bajo consumo de agua en comparación con las torres de enfriamiento evaporativa [11], [12]. En comparación con los enfriadores secos o *Dry Coolers*, los enfriadores adiabáticos presentan una mayor eficiencia energética, en particular, cuando la humedad relativa del aire es baja ya que, tras la adición de humedad al aire, este alcanza menores temperaturas en comparación al aire ambiente. Los *Dry Coolers* presentan un mayor consumo de energía porque los ventiladores arrastran un flujo de aire a mayor temperatura. Los enfriadores adiabáticos operan como los aero-enfriadores *Dry Coolers*, pero mejoran su desempeño a partir de un pre-enfriamiento adiabático del aire de entrada. Mediante este pre-enfriamiento adiabático, la temperatura de bulbo seco del aire de entrada se reduce a medida que pasa a través de un relleno evaporativo (almohadilla) especialmente diseñado para humectar y enfriar la corriente de aire de entrada al equipo sin formación de aerosoles ni agua arrastrada sobre el serpentín seco [13], [14].

En los enfriadores adiabáticos el aire al atravesar el relleno húmedo o almohadilla reduce su temperatura. Pruebas experimentales realizadas han demostrado que la temperatura de entrada del aire tras pasar por la sección de almohadillas húmedas alcanza a reducirse 5,51°C por debajo de la temperatura a la que ingresó el aire al enfriador [14]. Una de las principales ventajas que presentan los enfriadores adiabáticos en comparación con las torres de enfriamiento evaporativa es que las pérdidas por evaporación son mínimas, debido a que no utilizan rocío de agua en contacto con el aire, sino en las almohadillas húmedas, y adicionalmente, el principio de operación de este sistema también evita la concentración de impurezas y el desarrollo de microorganismos o bacterias como la Legionela, por lo que no requiere de tratamientos químicos adicionales como sí lo requieren las torres de enfriamiento convencionales [13], [14]. Los enfriadores adiabáticos sólo utilizan la cantidad de agua necesaria para lograr las condiciones de enfriamiento adiabático requeridas, por lo tanto, en consumo de agua no es constante y es mínimo en comparación con el consumo de agua de una torre de enfriamiento evaporativa [16]. Los enfriadores adiabáticos pueden integrarse con aero-enfriadores para operar como intercambiadores de calor híbridos o enfriadores híbridos los cuales pueden trabajar en modo seco es decir como aero-enfriador "*Dry Cooler*" o en modo húmedo "adiabático" [12], [15] - [17].

Otra de las diferencias fundamentales entre las torres húmedas (torre de enfriamiento o enfriador adiabático) y las torres secas (*Dry Cooler*), es que los sistemas húmedos pueden obtener temperaturas más bajas en los sistemas de refrigeración, por lo tanto, se pueden lograr temperaturas más bajas en la salida del enfriador. Sin embargo, los riesgos de emisión química y de bacterias como la Legionela son muy altos en el caso de las torres de enfriamiento a diferencia de los enfriadores adiabáticos donde este riesgo de Legionela es muy bajo y en los aero-enfriadores donde no se presenta este tipo de riesgo [17].

En este capítulo se realiza un análisis termodinámico de tres (3) tecnologías de enfriamiento: 1) *enfriamiento evaporativo*, 2) *Enfriamiento seco con pre-enfriamiento adiabático*, y 3) *Aero-enfriadores secos (Dry Coolers)*. Los modelos termodinámicos desarrollados permiten simular las condiciones operativas bajo diferentes escenarios para identificar las restricciones y beneficios de las tres tecnologías en función de condiciones atmosféricas como lo son la temperatura de bulbo seco, la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura de saturación adiabática (en el enfriador adiabático) y la humedad relativa. Los modelos se simulan con base en los parámetros operativos de una unidad de generación del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI), ya que esta será la central de mayor capacidad instalada en Colombia y que mayor exigencia térmica tendrá en los sistemas de refrigeración. Finalmente, el capítulo determina

las variables ambientales que favorecen o afectan cada tipo de tecnología; estos resultados permitirán seleccionar la tecnología más adecuada para las condiciones ambientales locales.

2. MÉTODO

La investigación realizada se desarrolló teniendo en cuenta un *Análisis termodinámico y de transferencia de calor y masa*. La solución del sistema de ecuaciones termodinámicas, de transferencia de calor y masa *se resuelve utilizando la versión académica del software Engineering Equation Solver EES*. La metodología que se emplea para realizar la evaluación de los enfriadores húmedos (torre de enfriamiento evaporativa, el enfriador adiabático) y secos (aero-enfriador *Dry Cooler*) es la siguiente:

2.1 Torre de enfriamiento evaporativa

Para realizar el balance de masa y energía de la torre de enfriamiento no se considera la transferencia de calor con la torre y los alrededores. Igualmente se considera que la potencia consumida por el motor del ventilador de la torre y otros consumos de energía son despreciables [9], [10]. La Figura 1 muestra las variables termodinámicas de entrada y de salida para el aire y el agua en una torre de enfriamiento con purga continua de agua y sin purga. La ecuación (1) presenta el balance de masa y energía para una torre de enfriamiento evaporativa sin purga.

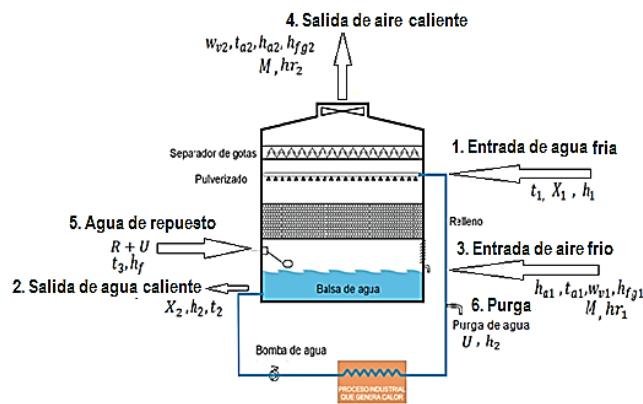


Figura 1. Balance de masa y energía para una torre de enfriamiento evaporativo [6]

$$(Mh_{a1} + W_{v1}Mh_{fg1}) + Xh_1 + Rh_f = (Mh_{a2} + W_{v2}Mh_{fg2} + Xh_2 \dots \dots \dots) \quad (1)$$

Donde:

c_p = calor específico de la mezcla de aire agua $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K}\right)$

t_1 = temperatura del agua entrando (°C)

X_1 = cantidad de agua que entra a la torre (kg/min)

h_1 = entalpía del agua que entra (kJ/kg)

t_2 = temperatura del agua saliendo (°C)

X_2 = cantidad de agua que sale de la torre (kg/min)

h_2 = entalpía del agua que sale (kJ/kg)

M = cantidad de aire seco (kg/min)

ρ = densidad del aire (kg/m³)

h_{a1} = calor sensible del aire que entra (kJ/kg)

t_{a1} = temperatura del aire que entra (°C)

t_{bh} = temperatura de bulbo húmedo (°C)

t_{sa} = temperatura de saturación adiabática (°C)

W_{v1} = humedad del aire de entrada $\left(\frac{kg_v}{kg_a}\right)$

h_{fg1} = calor latente del vapor de agua que entra (kJ/kg)

hr_1 = humedad relativa del aire de entrada (%)

h_{a2} = calor sensible del aire que sale (kJ/kg)

t_{a2} = temperatura del aire que sale (°C)

W_{v2} = humedad del aire de salida (kg_v/kg_a)

h_{fg2} = calor latente del vapor de agua que sale con el aire (kJ/kg)

hr_2 = humedad relativa del aire de salida (%)

R = agua de repuesto para compensar pérdidas (kg/min)

t_3 = temperatura del agua de repuesto (°C)

U = agua de purga continua para la torre (kg/min)

h_f = entalpía del agua de repuesto que entra a la torre (kJ/kg)

N_e = eficiencia de enfriamiento (%)

$M_{tot,ent}$ = mezcla total a la entrada del enfriador (kg/min)
 $M_{tot,sal}$ = mezcla total a la salida del enfriador (kg/min)
 $v_{especifico}$ = volumen específico de la mezcla a la salida (m^3/kg)
 $V_{salida\ venti}$ = volumen de salida de la mezcla por el ventilador (m^3/min)

Tomando en cuenta la purga continua de agua de la torre, La ecuación (2) presenta el balance de masa y energía para una torre de enfriamiento evaporativa con purga.

$$(Mh_{a1} + W_{v1}Mh_{fg1}) + Xh_1 + (R + U)h_f = (Mh_{a2} + W_{v2}Mh_{fg2}) + Xh_2 + Uh_2 \dots \dots \dots (2)$$

La mezcla total a la entrada y la mezcla total a la salida de la torre con purga continua de agua y sin purga se presentan en la ecuación (3) y en la ecuación (4).

$$M_{tot,ent} = M + M * w_{v1} \quad (3)$$

$$M_{tot,sal} = M + M * w_{v2} \quad (4)$$

El volumen específico de la mezcla a la salida que es donde suele colocarse el extractor de aire de la torre con purga continua de agua y sin purga se presenta en la ecuación (5).

$$v_{especifico} = v_{aireseco} + (v_{aireh\u00famedo} - v_{aireseco})x \ hr_2 \quad (5)$$

La ecuación (6) presenta el volumen de salida por ventilador de la torre para la de con purga continua y sin purga.

$$V_{salida\ venti} = M_{tot,sal} \ x \ v_{especifico} \quad (6)$$

La cantidad de agua de purga continua que requiere la torre de enfriamiento permite mantener la concentración de sales disueltas, en niveles razonables. La cantidad de agua de purga de la torre depende de la diferencia de temperaturas del agua y de las condiciones de agua de repuesto [8] - [10]. A la diferencia de temperatura del agua que sale de la torre y la temperatura del bulbo h\u00famedo del aire que entra a la misma, se denomina la *aproximaci\u00f3n de la torre* y se presenta en la ecuaci\u00f3n (7). La *aproximaci\u00f3n de la torre* es de gran importancia para el dise\u00f1o, dimensionamiento y costo de la torre, ya que mientras m\u00e1s reducido sea esta *aproximaci\u00f3n* mayor ser\u00e1 el tama\u00f1o de la torre [3]. La *aproximaci\u00f3n de la torre* no debe ser inferior a 3\u00b0C.

$$Aproximaci\u00f3n = t_2 - t_{bh} \quad (7)$$

La ecuaci\u00f3n (8) presenta la diferencia de temperaturas (*Delta T*) del agua a enfriar o rango de la torre [10].

$$Rango = t_2 - t_1 \quad (8)$$

En la ecuaci\u00f3n (9) se presenta la eficiencia de enfriamiento de la torre de enfriamiento (con purga y sin purga).

$$N_e = \frac{(t_1 - t_2)}{(t_1 - t_{bh})} \quad (9)$$

El flujo de agua de reposici\u00f3n *R* requerido para compensar las p\u00e9rdidas se presenta en la ecuaci\u00f3n (10).

$$R = M \ x \ (W_{v2} - W_{v1}) \quad (10)$$

2.2 Enfriadores adiab\u00e1ticos y aero-enfriadores "dry coolers"

la Figura 2 muestra la carta psicrom\u00e9trica y la trayectoria energ\u00e9tica y de humidificaci\u00f3n de la corriente de aire al pasar por un enfriador adiab\u00e1tico. La Figura 2 muestra que, en el proceso de enfriamiento adiab\u00e1tico del aire, al a\u00f1adir humedad a la corriente ocurre una ca\u00edda en la temperatura. Este proceso sigue una la l\u00ednea de entalp\u00eda constante. En un aero-enfriador *Dry Cooler* la transformaci\u00f3n que sufre el aire es un enfriamiento a humedad espec\u00edfica constante debido a que no existe aporte ni eliminaci\u00f3n de agua a esa corriente de aire [14]. En un aero-enfriador donde se intercambiar\u00e1 calor entre el agua y el aire, el flujo m\u00e1sico requerido para llevar a cabo el proceso de transferencia de calor puede llegar a ser de hasta 6 veces el requerido por una torre h\u00fameda.

Para un caso espec\u00edfico, el aire entra a una temperatura de bulbo seco de 35\u00b0C (punto 1) con una temperatura de bulbo h\u00famedo de 21\u00b0C (punto 2), a la vez que la humedad relativa es del 28% (punto 3). Por lo tanto, se observa como el aire obtiene una ganancia de humedad al pasar a trav\u00e9s de la almohadilla de humectaci\u00f3n (punto 5) [17]. La evaporaci\u00f3n producida incrementa la humedad del aire a la salida y se reduce la temperatura de bulbo seco (punto 4); el aire sale a una temperatura inferior a la que entr\u00f3 al enfriador (punto 6) [17].

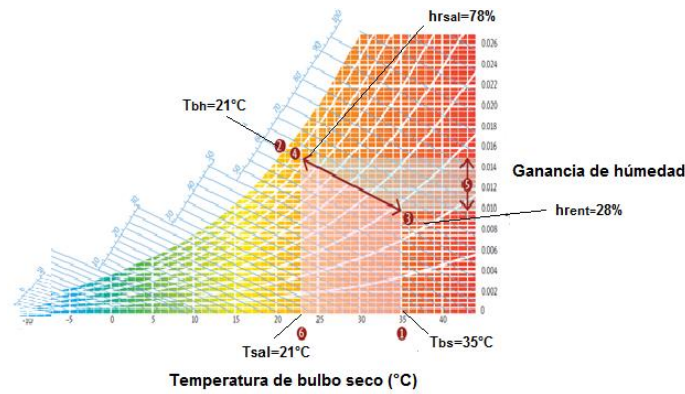


Figura 2. Transformación Psicrométrica de un enfriador adiabático [17]

En el balance de masa y de energía de un sistema adiabático se asume que el enfriador opera con un flujo constante y que la transferencia de calor con los alrededores es despreciable. Una mezcla de vapor aire-agua de humedad conocida W entra al enfriador adiabático con una presión P y temperatura de salida T_{sa} , que es la temperatura de saturación adiabática [9]. La temperatura de saturación adiabática T_{sa} también se aproxima a la temperatura de bulbo húmedo T_{bh} o puede calcularse aplicando la ecuación de conservación de energía para un enfriador adiabático [9]. Para condiciones de estado estacionario, la rata de flujo de aire que entra es igual a la que sale, es decir M . La rata de flujo de agua de reposición es la diferencia entre la rata de flujo de vapor a la salida y a la entrada [9]. Planteando el balance de masa y de energía del enfriador adiabático se obtiene la ecuación (11).

$$(Mh_{a1} + W_{v1}Mh_{fg1})_{\text{aire húmedo entrada}} + (Rh_w)_{\text{agua reposición}} = (Mh_{a2} + W_{v2}Mh_{fg2})_{\text{aire húmedo salida}} \quad (11)$$

Para el balance de energía deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las corrientes de aire húmedo se consideran una mezcla de gases ideales de aire seco y vapor de agua.
- El intercambio de calor con los alrededores es despreciable.
- No se realiza trabajo y los cambios de energía cinética y potencial son despreciables.

Al dividir la ecuación de balance de energía del enfriador adiabático por la rata de flujo másico de aire M , la ecuación de balance de energía se puede reescribir con la ecuación (12).

$$(h_{a1} + w_{v1}h_{fg1})_{\text{aire húmedo entrada}} + (Rh_f)_{\text{agua reposición}} = (h_{a2} + w_{v2}h_{fg2})_{\text{aire húmedo salida}} \quad (12)$$

El flujo másico de aire del enfriador adiabático se presenta en la ecuación (13).

$$M = Vol_{\text{aire}} \times \rho \quad (13)$$

En la Figura 3 se presenta el diagrama esquemático de un enfriador adiabático con recirculación de agua a partir de las siguientes consideraciones [14]:

- El caudal de agua de repuesto es despreciable en comparación al agua recirculada.
- La transferencia de calor y de masa es únicamente en la dirección normal a los flujos.
- Se desprecia la transferencia de calor y de masa a través de las paredes al exterior.
- Se considera que el agua no cambia de temperatura cuando atraviesa el equipo.
- El flujo másico de agua circulante es mucho mayor que la del aire.

En la Figura 3 se presenta el volumen de control con las variables que describen las ecuaciones de conservación que gobiernan la transferencia de calor y de masa entre la corriente de aire húmedo y el flujo de agua que circulan por el interior de un enfriador adiabático [14].

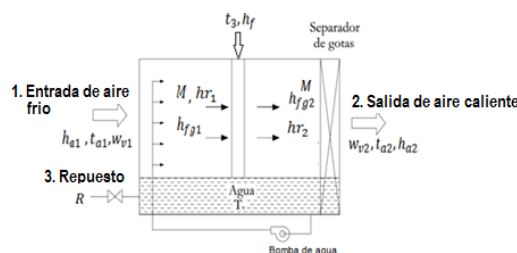


Figura 3. Volumen de control de un enfriador adiabático

La eficiencia de enfriamiento en el enfriador adiabático se define en la ecuación (14).

$$N_e = \frac{t_{a1} - t_{sa}}{t_{a1} - t_{bh}} \quad (14)$$

El flujo másico de mezcla total a la entrada y la mezcla total a la salida del enfriador adiabático se describen con la ecuación (15) y con la ecuación (16) respectivamente.

$$M_{tot\ ent} = M + Mx W_{v1} \quad (15)$$

$$M_{tot\ sal} = M + Mx W_{v2} \quad (16)$$

El volumen específico de la mezcla a la salida de la torre, que es el lugar físico donde suele colocarse el extractor de aire del enfriador adiabático se describe a partir de la ecuación (17).

$$v_{especifico} = v_{aireseco} + [(v_{airehúmedo} - v_{aireseco}) x hr_2] \quad (17)$$

Luego el volumen de salida del ventilador del enfriador adiabático se presenta en la ecuación (18).

$$V_{salida\ venti} = M_{tot, sal} * v_{especifico} \quad (18)$$

En un aero-enfriador no se emplea flujo másico de agua para realizar la transferencia de calor entre el aire y el agua del proceso, por lo tanto, se considera que para condiciones de estado estacionario del aero-enfriador, la rata de flujo de aire que entra es igual a la que sale, es decir M . El balance de masa y energía está sujeto a las suposiciones:

- El enfriador de aire está aislado de sus alrededores, en cuyo caso el único intercambio de calor es entre los fluidos caliente y frío.
- La conducción axial a lo largo de los tubos es despreciable.
- Los cambios de energía potencial y cinética son despreciables.
- Los calores específicos del fluido son constantes.
- El coeficiente global de transferencia de calor es constante

Planteando el balance de masa y de energía del aero-enfriador se obtiene la ecuación (19).

$$(Mh_{a1} + W_{v1}Mh_{fg1})_{aire\ húmedo\ entrada} = (Mh_{a2} + W_{v2}Mh_{fg2})_{aire\ húmedo\ salida} \quad (19)$$

Al dividir la ecuación de balance de energía del aero-enfriador por la rata de flujo másico M , se obtiene la ecuación (20) para el balance de masa y de energía.

$$(h_{a1} + w_{v1}h_{fg1})_{aire\ húmedo\ entrada} = (h_{a2} + w_{v2}h_{fg2})_{aire\ húmedo\ salida} \quad (20)$$

El flujo másico de aire del aero-enfriador se expresa en la ecuación (21).

$$M = Vol_{aire} x \rho \quad (21)$$

La eficiencia del aero-enfriador se puede expresar con la ecuación (22).

$$N_e = \frac{(t_{a2} - t_{a1})}{(t_{a2} - t_{bh})} \quad (22)$$

La mezcla total a la entrada y la mezcla total a la salida del aero-enfriador se describen con la ecuación (23) y con la ecuación (24) respectivamente.

$$M_{tot, sal} = M + M * w_{v2} \quad (23)$$

$$M_{tot\ ent} = M + Mx W_{v2} \quad (24)$$

Con la ecuación (25) se describe el volumen específico de la mezcla a la salida que es donde suele colocarse el extractor de aire del aero-enfriador.

$$v_{especifico} = v_{aireseco} + (v_{airehúmedo} - v_{aireseco}) x hr_2 \quad (25)$$

Luego el volumen de salida del ventilador del aero-enfriador se presenta la ecuación (26).

$$V_{salida\ venti} = M_{tot, sal} x v_{especifico} \quad (26)$$

3. RESULTADOS

3.1 Sensibilidad de la torre de enfriamiento, enfriador adiabático y Aero-enfriador "Dry Cooler"

A continuación, en la Figura 4 se presentan los resultados de las simulaciones de las tres tecnologías de enfriamiento para identificar el flujo másico de aire M requerido para llevar a cabo el proceso de enfriamiento, y en la Figura 5 se presenta el volumen de aire V que debe extraer el ventilador de cada enfriador en función de la humedad relativa del aire. El volumen de aire de salida está asociado al gasto energético del ventilador para extraer masa de aire seco y húmedo a la que se le ha transferido calor.

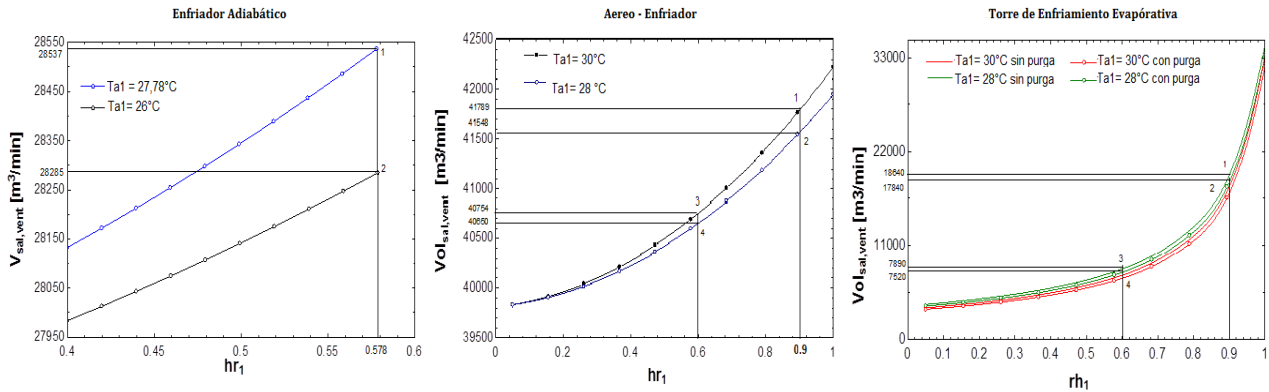


Figura 4. Comparativo del volumen de salida del aire $[V]$ entre la torre de enfriamiento evaporativa, el enfriador adiabático y el Aero-enfriador. $\text{Vol} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right]$ vs Humedad $[hr_1]$

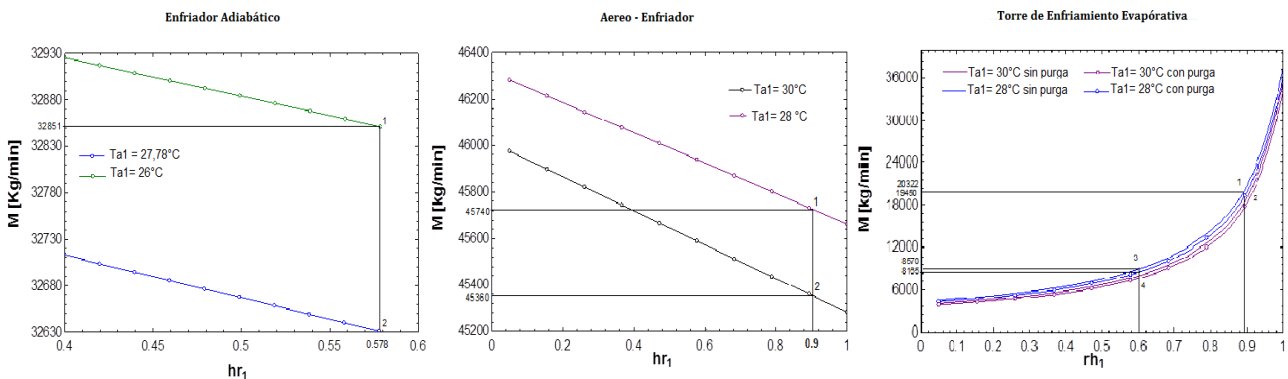


Figura 5. Comparativo del Flujo másico de aire $[M]$ entre la torre de enfriamiento con evaporativa, el enfriador adiabático y el Aero-enfriador. $M \left[\frac{\text{Kg}}{\text{min}} \right]$ vs Humedad $[hr_1]$

Adicionalmente, en la Figura 6 se presenta una simulación para identificar el consumo de flujo másico de agua de reposición R en función de la humedad relativa para llevar a cabo el proceso de enfriamiento evaporativo con la torre de enfriamiento y para llevar a cabo el pre-enfriamiento adiabático con el enfriador adiabático. Posteriormente, en la Figura 7 se presenta la eficiencia de enfriamiento Ne de cada de tecnología de enfriamiento en función de la temperatura de bulbo húmedo T_{bh} con el fin de identificar el desempeño de cada tecnología para las condiciones atmosféricas en el PHI.

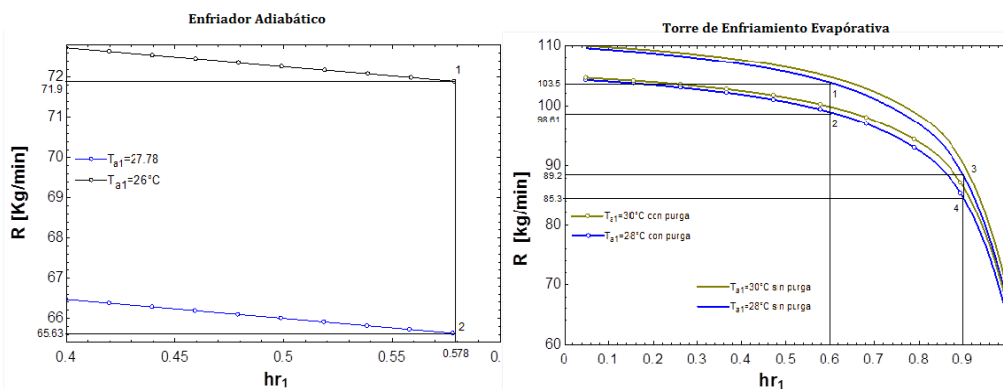


Figura 6. Comparativo del Flujo másico de agua $[R]$ entre la torre de enfriamiento evaporativa, el enfriador adiabático y el Aero-enfriador. $R \left[\frac{\text{Kg}}{\text{min}} \right]$ vs Humedad $[hr_1]$

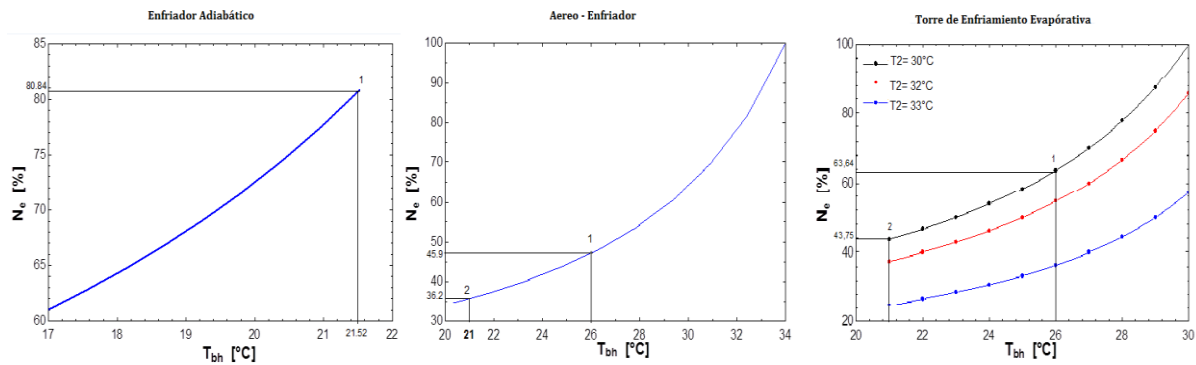


Figura 7. Comparativo de la eficiencia [Ne] de enfriamiento entre la torre de enfriamiento evaporativa, el enfriador adiabático y el Aero-enfriador

Al comparar las tres tecnologías de enfriamiento a partir de los volúmenes de aire caliente evacuados al exterior y del flujo másico de aire que requieren para enfriar el mismo flujo másico de agua del proceso que es de 9695 kg/min (para una unidad de generación de energía del PHI), se observa que la torre de enfriamiento evaporativa con purga continua es el sistema que requiere evacuar la menor cantidad de aire caliente entre los dos tipos de torre de enfriamiento evaporativas, siendo de 7520 m³/min y un flujo másico de aire de 8165 kg/min cuando la humedad relativa es del 60% y la temperatura de entrada del aire es de 28°C, luego le sigue el enfriador adiabático con 28537 m³/min y 32631 kg/min respectivamente con una humedad relativa de 57,87% que es la humedad máxima a la que puede operar esta tecnología para las condiciones del PHI y una temperatura de entrada de aire de 27,78 °C; finalmente el aero-enfriador requiere de 40650 m³/min y de 45924 kg/min para temperaturas de 28°C y humedad relativa del 60%. Esto muestra que la tecnología que demandará de un mayor consumo de energía asociado al sistema de ventilación para condiciones atmosféricas del PHI será el Aero-enfriador.

Al comparar el flujo másico de agua de reposición R requerido por la torre de enfriamiento para llevar a cabo el enfriamiento evaporativo, y el flujo másico de agua de reposición requerido por enfriador adiabático R para llevar a cabo el proceso de enfriamiento adiabático, se identifica que el enfriador adiabático requiere de un flujo másico de agua de 65,63 kg/min cuando la humedad relativa del aire es del 57,87 % y la temperatura del aire es de 27,78°C, mientras que la torre de enfriamiento evaporativa con purga continua requiere de un flujo másico de agua R de 98,61 kg/m cuando la humedad relativa es del 60% y la temperatura del aire es de 28°C. Esto muestra que efectivamente el enfriador adiabático representa ahorro cercano al 33,4% para condiciones atmosféricas similares. El aero-enfriador por su parte no requiere de agua de reposición lo cual es una ventaja considerable en zonas áridas donde hay limitaciones o restricciones para la utilización de agua o bajo criterios de selección donde prima la conservación de agua por políticas ambientales.

El aero-enfriador *Dry Cooler* no presenta limitaciones operativas en función de la temperatura de bulbo húmedo o de la humedad relativa del aire como si lo presentan la torre de enfriamiento y el enfriador adiabático respectivamente. Sin embargo, el flujo másico de aire y el volumen de aire que debe evacuar el aero-enfriador son mayores a los de la torre de enfriamiento y al del enfriador adiabático. Esto representará un mayor gasto energético.

3.2 Comparación entre las eficiencias de enfriamiento de la torre de enfriamiento evaporativa, el enfriador adiabático y el aero-enfriador en función de la temperatura de bulbo húmedo

En la Figura 8 se presenta una comparación entre la eficiencia de enfriamiento de la torre de enfriamiento, el sistema de enfriamiento adiabático y el aero-enfriador *Dry cooler* en función de la temperatura de bulbo húmedo para las condiciones atmosféricas del PHI.

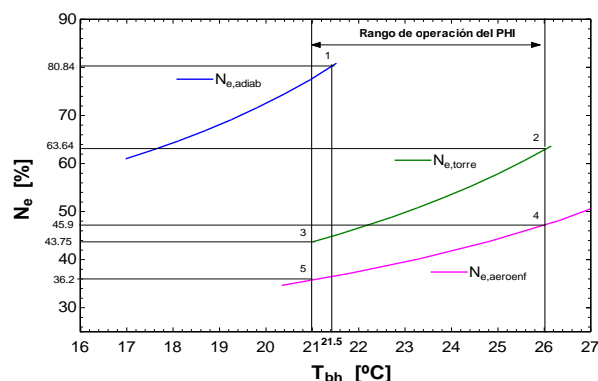


Figura 8. Comparación de la eficiencia de enfriamiento entre la torre de enfriamiento evaporativa, el enfriador adiabático y el aero-enfriador *Dry Cooler* en función de la temperatura de bulbo húmedo

La Figura 8 muestra una comparación entre la eficiencia de enfriamiento que se puede alcanzar con la torre de enfriamiento evaporativa con purga continua, el enfriador adiabático y el aero-enfriador Dry Cooler; las dos primeras tecnologías de acción evaporativa directa y el Dry Cooler de acción evaporativa indirecta. La Figura 8 también muestra el rango de operación estimado del PHI (Tbh entre 21°C y 26°C) de acuerdo a las condiciones meteorológicas históricas del sitio del proyecto. También se observa el rango operativo en el que trabajarían las tres tecnologías de enfriamiento propuestas para los sistemas de refrigeración del PHI con sus respectivas eficiencias de enfriamiento. En cuanto a las temperaturas del aire de entrada Ta1 en el PHI se estima que estas pueden estar entre 26°C y 30°C aproximadamente.

Como se puede observar, para las condiciones atmosféricas del PHI, el enfriador adiabático entregaría la mayor eficiencia entre las tres tecnologías que sería de 80,84% cuando la Tbh es de 21,5°C, pero operaría en un rango muy reducido que es entre 21°C y 21,5°C ya que, de acuerdo al modelo termodinámico, es en este último punto (punto 1) donde se alcanza la humedad relativa del 57,87% % y este equipo debe suspender su operación. El aero-enfriador puede operar a partir de una temperatura de bulbo húmedo de 21°C (o antes) sin restricción entregando una eficiencia del 45,9 % (punto 4) cuando la Tbh es de 26°C. Sin embargo, este enfriador no presenta restricciones operativas en cuanto a la temperatura de bulbo húmedo ni a la humedad relativa lo cual es una ventaja considerable. El aero-enfriador entregará la eficiencia más baja a una menor temperatura de bulbo húmedo, el caso del PHI, cuando la Tbh es de 21°C donde se obtiene una eficiencia de 36,2% (punto 5). Esta tecnología puede operar dentro del rango de operación completo del PHI.

La torre de enfriamiento evaporativa podría operar dentro del rango de operación completo del PHI alcanzando su máxima eficiencia cuando la Tbh se acerca a la temperatura de salida del agua de la torre T2; mientras más se aleje la Tbh de T2 más baja será la eficiencia de la torre de enfriamiento. Se observa que para emplear este tipo de tecnología se debe garantizar que las temperaturas de bulbo húmedo Tbh y de salida del agua T2 cumplan el principio de Aproximación de las torres de enfriamiento de acción evaporativa para optimizar el tamaño y el desempeño del equipo. La Aproximación de la torre no deberá ser inferior a 3°C.

En la gráfica de la eficiencia de la torre de enfriamiento de la *Figura 8* se observa que cuando Tbh es de 21°C, la torre de enfriamiento alcanzará una eficiencia de enfriamiento del 43,75 % (punto 3) y si la Tbh es de 26°C la eficiencia será de 63,64% (punto 2) para las condiciones de bulbo húmedo del PHI. La torre de enfriamiento evaporativa puede alcanzar eficiencias cercanas al 100%. Sin embargo, para las temperaturas del fluido de proceso y la temperatura de bulbo húmedo que se tienen en el PHI, la máxima eficiencia que se lograría con esta tecnología sería la de 63,64%.

En las torres de enfriamiento evaporativa la eficiencia de enfriamiento depende directamente de las temperaturas de entrada y de salida del agua de la torre y de la temperatura de bulbo húmedo del aire; a diferencia del enfriador adiabático y del aero-enfriador, donde la eficiencia de enfriamiento depende directamente de las temperaturas de entrada y salida del aire y de la temperatura de bulbo húmedo.

3.3 Comparación entre las eficiencias de enfriamiento de la torre de enfriamiento evaporativa, el enfriador adiabático y el aero-enfriador con respecto a la humedad relativa de entrada

En la Figura 9 se observa la eficiencia de enfriamiento entregada por la torre de enfriamiento evaporativa, el enfriador adiabático y el aero-enfriador en función de la humedad relativa del aire que ingresa al enfriador. La Figura 9 es simulada para las mismas condiciones de operación que se simularon para la Figura 8 pero la eficiencia es presentada en función de la humedad relativa del aire de entrada. Como puede observarse en la Figura 9, el enfriador adiabático puede operar en humedades relativas que van desde el 52% hasta el 57,8% entregando una eficiencia de 80,8% (punto 1) para las condiciones atmosféricas del PHI. La torre de enfriamiento puede operar con humedades relativas que van desde el 52% hasta 72%, siendo en este punto donde la torre entrega su máxima eficiencia que es de 63,6% (punto 2) y de 43,7% (punto 3) cuando la humedad relativa es de 52%.

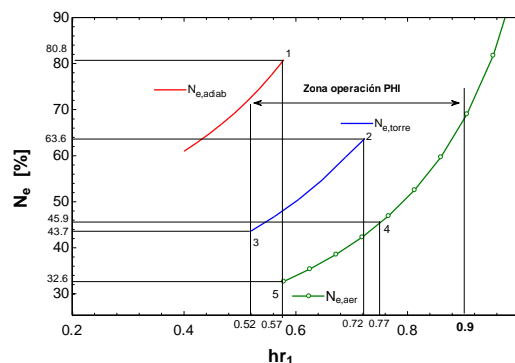


Figura 9. Comparación de la eficiencia de enfriamiento entre la torre de enfriamiento evaporativa, el enfriador adiabático y el aero-enfriador *Dry Cooler* en función de la humedad relativa

El aero-enfriador puede operar dentro de toda la zona de operación del PHI incluso hasta el 100% de humedad relativa si fuera del caso. Sin embargo, se observa que cuando la humedad relativa es de 52% el aero-enfriador entrega una eficiencia de 32,6% (punto 5) y cuando la humedad es del 77% la eficiencia que entrega el aero-enfriador es del 45,9% (punto 4). La Figura 9 muestra que para el caso de un enfriador híbrido (húmedo-seco), cuando se alcanza la humedad relativa máxima de operación en modo adiabático para las condiciones del PHI (punto 1), el enfriador híbrido continúa la operación para humedades relativas superiores, pero en modo seco o sin pre-enfriamiento adiabático (punto 5) y hasta humedades relativas que pudieran llegar al 100% de saturación sin limitación operativa.

4. CONCLUSIONES

El modelo termodinámico desarrollado para la torre de enfriamiento evaporativa, muestra que, en la selección de este tipo de tecnología, las variables atmosféricas más importante para el diseño y selección de esta tecnología son: la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco del aire de entrada; ambas variables están íntimamente ligadas a la temperatura de bulbo húmedo T_{bh} .

La Aproximación de la torre de enfriamiento es uno de los parámetros relevantes en la selección y cálculo de las torres de enfriamiento. La aproximación es la diferencia de la temperatura de bulbo húmedo menos la temperatura de salida real del agua de la torre. La aproximación de la torre no debe ser inferior a 3°C para definir la viabilidad de utilizar este tipo de tecnología dependiendo de las condiciones atmosféricas del sitio o ubicación geográfica donde se encuentra la central de generación de energía.

El modelo termodinámico desarrollado para la torre de enfriamiento evaporativa, permitió simular una torre con purga continua de agua y una torre que opera sin purga de agua para diferentes condiciones atmosféricas. Al comparar los resultados obtenidos mediante el modelo termodinámico, para la torre de enfriamiento con purga continua de agua y para la torre sin purga, se concluye que entre estas dos opciones, la torre de enfriamiento con purga continua requiere menos flujo másico de aire y por lo tanto un menor gasto energético para evacuar el volumen de aire caliente al ambiente; esto debido a que la purga continua favorece el proceso de enfriamiento evaporativo, ya que el agua de reposición ingresa a la torre con una temperatura más baja que la del agua del proceso que se está enfriando y recircula por la torre. Por tal motivo, se puede concluir que la torre de enfriamiento con purga continua es más eficiente y una menor temperatura de agua de purga favorece el proceso de enfriamiento evaporativo.

El flujo másico de agua de reposición " R ", requerido para compensar las pérdidas por la torre de enfriamiento y para el enfriador adiabático se reduce a medida que aumenta la humedad relativa del aire que entra al sistema. Esto se explica, debido a que si el aire ingresa a la torre húmeda tiene un mayor contenido de humedad, el agua requerida para la reposición será menor ya que la evaporación generada durante el intercambio de calor entre el agua y el aire será menor. Si la disponibilidad del recurso hídrico en la zona es limitada sería más recomendable seleccionar una torre seca como un aero-enfriador Dry Cooler.

El modelo termodinámico desarrollado para el enfriador adiabático, permite identificar que esta tecnología presenta grandes beneficios y altos desempeños cuando la humedad relativa del ambiente no sobrepasa el 60% (57,87% para el caso específico del PHI). Sin embargo, la evaluación integral de este trabajo permitió identificar que los enfriadores híbridos tienen la posibilidad de trabajar en modo adiabático hasta humedades relativas del 60% y cuando las humedades relativas se incrementan por encima de este valor, los enfriadores híbridos suspenden el modo de operación húmedo y cambian a modo de operación seco para trabajar como aero-enfriador.

El pre-enfriamiento adiabático garantiza que el aire salga a una temperatura de entre 5°C y 6°C menor a la que entró el aire al enfriador, conforme con los resultados arrojados por el análisis del enfriamiento adiabático y los resultados arrojado por el modelo termodinámico de esta tecnología de enfriamiento.

El aero-enfriador *Dry Cooler* se considera una alternativa viable y atractiva para las condiciones de operación del PHI y de centrales de generación de energía en general, ya que esta tecnología de enfriamiento puede operar dentro de los rangos de operación del PHI e incluso por fuera de ellos, aunque con eficiencias más bajas a las entregadas por la torre evaporativa y el enfriador adiabático. Sin embargo, los enfriadores secos ayudan a preservar los recursos hídricos, especialmente en zonas o regiones áridas.

Otra variable que puede influenciar el desempeño de las torres secas y de las torres húmedas es la velocidad del aire; aunque esta variable no se simuló, la revisión literaria permitió identificar que el incremento de la velocidad del aire pasando a través de la torre puede favorecer el proceso de enfriamiento y de transferencia de calor.

REFERENCIAS

- [1] Sciencedirect.com. (2019). *Energy* | Vol 160, Pages 1-1244 (1 October 2018) | ScienceDirect.com. [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/journal/energy/vol/160/suppl/C> [Accessed 16 Jun. 2019]., pp. 1133-1143, 2018.
- [2] T. Wu, Z. Ge, L. Yang, X. Du. (2019). Modeling the performance of the indirect dry cooling system in a thermal power generating unit under variable ambient conditions.

- [3] T. Wu, Z. Ge, L. Yang, X. Du. (2019). Cooling water mass flow optimization for indirect dry cooling system of thermal power unit under variable output load.
- [4] G. Xin, J. Zhu, F. Jiang, Y. Zhao. (2019). Experimental and numerical analysis of solar enhanced natural draft dry cooling tower., pp. 89–96, 2017.
- [5] M. Lucas a, P. Martínez, A. Viedma (2009). Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminator. *Energy Conversion and Management*, 50, 490-497.
- [6] M. Jiaze, Y. Wang, X. Feng. (2017). Energy recovery in cooling water system by hydro turbines. *Energy*, 139, 329-340.
- [7] R. Treybal (1981). *Operaciones de Transferencia de Masa*. Mc Graw – Hill Book Co.
- [8] EasyEngineering. (2019). [PDF] *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. M. Moran, H. Shapiro, D. Boettner, M. Bailey. [Online] Available at: <https://easyengineering.net/fundamentals-of-engineering-thermodynamics/> [Accessed 16 Jun. 2019].
- [9] A. Rios. (2019). *Fundamentos de aire acondicionado refrigeración* Libro Autor Hernández Goribar, Eduardo Editor Limusa. [Online] [Marciavazquezsan.blogspot.com](https://marciavazquezsan.blogspot.com). Available at: <https://marciavazquezsan.blogspot.com/2013/08/fundamentos-de-aire-acondicionado.html> [Accessed 16 Jun. 2019].
- [10] Anon, (2019). [Online] Available at: https://www.researchgate.net/profile/M_Lucas2 [Accessed 16 Jun. 2019].
- [11] J. Camargo, C. Ebinuma, J. Silveira. (2019). Thermo-economic analysis of an evaporative desiccant air conditioning system., 23, 1537-1549.
- [12] M. Lucas, P. Martínez, A. Viedma. (2019). Comparative experimental drift study between a dry and adiabatic fluid cooler and a cooling tower. 31, 1169-1175.
- [13] studylib.es. (2019). XVIII Congreso nacional de ingeniería mecánica. [Online] Available at: <https://studylib.es/doc/8196006/xviii-congreso-nacional-de-ingenier%C3%ADa-mec%C3%A1nica> [Accessed 16 Jun. 2019].
- [14] X. Huang, D. Zhang, X. Zhang. (2019). Experimental Research on the Heat and Mass Transfer Characteristics of Corrugated Plate Spray Humidification Air Coolers., 32,264–271.
- [15] M. D'Antoni, D. Romeli, R. Fedrizzi. (2019). A model for the performance assessment of hybrid coolers by means of transient numerical simulation. *Applied energy*, 181, 477 - 494.
- [16] T Ltd. (2019). *Intelligent cooling with Transtherm's Adiabatic Systems - Transtherm*. [Online] Transtherm. Available at: <https://transtherm.co.uk/intelligent-cooling-with-transtherms-adiabatic-systems/> [Accessed 16 Jun. 2019].
- [17] J. Herrera, C. Chamorro, M. Martín. (2019). Experimental analysis of performance, greenhouse gas emissions and economic parameters for two cooling systems in a public administration building. *Energy and Buildings*, 108, 145–155.

Análisis termoeconómico del distrito térmico La Alpujarra en Medellín

Juan D. Amariles L.¹

Sergio C. Agudelo F.²

Andrés F. Agudelo S.³

Universidad de Antioquia – Colombia

Es evidente que las crisis energéticas han potencializado los estudios para aprovechar de manera más integral la energía que se encuentra en los combustibles. Los distritos térmicos son sistemas que producen de manera centralizada energía térmica y la distribuyen vía tuberías hasta cada uno de sus clientes. Empresas Públicas de Medellín E.S.P construyó un distrito térmico en Medellín. El sistema produce el agua fría que requieren los sistemas de aire acondicionado de algunos edificios del sector público. El distrito está compuesto por una micro turbina de gas acoplada a un sistema de absorción, y a varios equipos de compresión de amoniaco. Dentro de este estudio se realiza un análisis termoeconómico con el objetivo de determinar los costos de producción bajo condiciones reales de operación de la planta, la cual se considera un sistema complejo al estar conformada por diferentes sistemas energéticos integrados. Además, se realiza un análisis de sensibilidad a las condiciones ambientales, para observar cómo se ven afectados los costos de producción. Para el análisis se utilizan conceptos de la Teoría del Costo Exergético aplicados a la termoeconomía. Dentro de los resultados más relevantes se encuentra que la tonelada de refrigeración (TR) producida por el distrito térmico incrementa su coste en 0.5 % por cada grado que incrementa la temperatura ambiente. Esto se debe a que los equipos tienen un consumo energético menor con una temperatura ambiente baja, y este consumo incrementa con el aumento de la misma temperatura, acarreando costos termodinámicos adicionales. Por medio de este estudio se pudo validar la utilidad del análisis termoeconómico como herramienta para el estudio de distritos de enfriamiento en países con climas tropicales, en los cuales hay variaciones diarias significativas de las condiciones ambientales. Se considera que los resultados son confiables debido a que para los análisis se utilizó información técnica, económica y administrativa de primera mano.

Nomenclatura utilizada

<i>DTLA</i>	Distrito térmico La Alpujarra
<i>CCHP</i>	Combinación de frío, calor y electricidad, por sus siglas en inglés
<i>COP</i>	Coefficiente de desempeño, por sus siglas en inglés
<i>EPM</i>	Empresas Públicas de Medellín E.S.P
ε	Efectividad de un intercambiador de calor
<i>HRSG</i>	Caldera de recuperación de calor, por sus siglas en inglés
<i>mTG</i>	Microturbina a gas natural
<i>m</i>	Número de flujos de un sistema
<i>n</i>	Número de equipos o componentes de un sistema
kW_e	Kilovatios eléctricos
kW_t	Kilovatios térmicos
<i>TR</i>	Tonelada de Refrigeración, unidad de potencia = $3.517 kW_t$
\hat{C}_{ex}	Coste exergético de un flujo (kW)
c_{ex}	Coste exergético unitario de un flujo (kW/kW)
<i>C</i>	Coste exergoeconómico de un flujo (USD/h)
<i>c</i>	Coste exergoeconómico unitario de un flujo ($cUSD/h$)
\hat{C}_F	Coste exergético del recurso (kW)
\hat{C}_P	Coste exergético del producto (kW)
C_F	Coste exergoeconómico del recurso (USD/h)
C_P	Coste exergoeconómico del producto (USD/h)
\dot{E}	Exergía de un flujo
<i>I</i>	Irreversibilidad de un componente
η	Rendimiento termodinámico de un sistema (%)
η_{II}	Rendimiento exergético de un sistema (%)
$\$COP$	Peso colombiano $\$COP$
<i>PEC</i>	Coste de adquisición de un equipo, por su sigla en inglés
<i>T</i>	Temperatura (C)
T_{amb}	Temperatura ambiente (C)
\dot{Z}_k	Coste no termodinámico de un componente
<i>A</i>	Matriz de incidencia ($n \times m$)
A_F	Matriz de incidencia de recurso ($n \times m$)
A_P	Matriz de incidencia de producto ($n \times m$)
<i>E</i>	Vector de exergías ($m \times 1$)
α	Matriz de ecuaciones auxiliares ($(m - n) \times m$)
\mathbb{A}	Matriz de costos ($m \times m$)
\mathbb{Y}	Vector de amortización de exergética ($m \times 1$)
ω	Vector auxiliar de términos independientes ($(m - n) \times 1$)

¹ juan.amariles@udea.edu.co

² sergio.agudelo@udea.edu.co

³ andres.agudelos@udea.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2016, Empresas Públicas de Medellín (EPM) construyó un distrito de frío en la ciudad de Medellín, en el sector de la Alpujarra, llamado Distrito Térmico la Alpujarra -DTLA-. Éste produce energía térmica que se transporta mediante agua fría, la cual requieren los sistemas de aire acondicionado de los edificios de La Gobernación y La Asamblea, El Municipio y El Concejo de Medellín, La Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales -DIAN-, El Área Metropolitana Valle de Aburrá (AMVA) y La Empresa de Desarrollo Urbano de Medellín. Con este proyecto se busca la mejora en la eficiencia energética de los edificios y se sustituyen enfriadores que utilizan sustancias agotadoras de la capa de ozono y sustancias de alto impacto ambiental, contribuyendo así de manera efectiva al cumplimiento de los compromisos del país con el Protocolo de Montreal, las metas de la Estrategia Colombiana de Desarrollo bajo en Carbono y el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía -PROURE- [1].

Los distritos térmicos son plantas que centralizan la producción de energía térmica (calor o frío) para climatización. Dicha energía se conduce por tuberías subterráneas hasta cada uno de los edificios clientes. Los distritos térmicos son procesos flexibles que permiten utilizar cualquier tipo de recurso energético, desde combustibles fósiles, energías renovables, hasta energías residuales de procesos [2]. Estos distritos no sólo ofrecen excelentes oportunidades para la reducción de gases de efecto invernadero, sino que también logran ahorros significativos de energía, comparados con sistemas de climatización convencionales [3].

El DTLA es la primera planta de su tipo en Colombia y debido a su reciente funcionamiento no se tienen datos característicos de operación que validen el desempeño teórico del proceso. Para la producción de agua fría el distrito utiliza un sistema de cogeneración con micro turbina a gas natural acoplada a un enfriador de absorción de doble efecto. El DTLA produce parte de la energía eléctrica y térmica que requiere el sistema para la producción de frío. Esta configuración se conoce a nivel mundial como combinación de frío, calor y electricidad (CCHP).

El concepto de termoeconomía se desarrolló como una herramienta avanzada para el estudio sistemático de sistemas energéticos. Con la segunda ley, aplicada con los conceptos de irreversibilidad y exergía, es posible determinar las fuentes reales y las causas de las pérdidas de energía. La economía se utiliza para introducir el concepto de coste, en energía o en dinero, lo cual permite evaluar posibles propuestas de mejora financiera [4].

El número de instalaciones de sistemas CCHP ha estado en aumento a nivel mundial. En consecuencia, el diseño y la operación eficientes se están convirtiendo en temas de gran importancia. La evaluación del desempeño de estos sistemas es un proceso necesario para lograr soluciones económicas y amigables con el medio ambiente [5]. En los últimos años algunos autores han evaluado el desempeño de los sistemas CCHP utilizando diferentes métodos, entre los cuales se encuentran los siguientes: a) mejora del desempeño a través de análisis energético y exergético; b) evaluación del desempeño utilizando pruebas de campo y modelos de simulación transitorios; c) mejora del desempeño optimizando el diseño del sistema y desarrollando una estrategia operativa [5]. En este estudio en particular, se analizará el desempeño del DTLA utilizando un análisis termoeconómico.

Existen numerosos estudios que han evaluado el desempeño de sistemas CCHP por medio de análisis termoeconómico [6]-[13]. Entre éstos, diferentes autores han identificado los efectos que tiene la variación de algunos parámetros sobre el desempeño global del sistema [6], [8]. Algunas de las variables analizadas son: presión del aire en la entrada del compresor y variación de la temperatura de entrada a la turbina, variaciones de presión y temperatura en la caldera de recuperación -HRSG-, las eficiencias isentrópicas de la turbina y del compresor, y la temperatura de entrada al generador del enfriador de absorción. Ghaebi et al. [6] realizan el análisis termoeconómico de un sistema que combina refrigeración, calefacción y electricidad aplicando la primera y segunda ley de la termodinámica, así como el análisis de costos. El objetivo es observar los efectos que tiene la obtención de los diferentes productos sobre el consumo de combustible. Se encontró que, al aumentar la relación de presión en el compresor de la turbina, disminuye el consumo de combustible. La producción de frío también aumenta debido al incremento del flujo másico de vapor en el evaporador del HRSG. Además, la eficiencia de primera y segunda ley, y el coste total del sistema también varían.

Deng et al. [7] aplican la teoría estructural de la termoeconomía para analizar un sistema de micro trigeneración que está compuesto por un motor de combustión interna que opera con gas natural o gas licuado de petróleo de 12 kW y un enfriador de adsorción de 9 kW. El sistema produce electricidad, agua caliente y agua fría. Dentro de los resultados se encuentra que el coste exergético unitario para la energía eléctrica es aproximadamente 4.15 kW/kW. El coste del agua fría es el más alto: 17.19 kW/kW, mientras que para el agua caliente es el más bajo: 3.29 kW/kW. Además, la eficiencia exergética del sistema de micro cogeneración es 5.82% para el sistema de enfriamiento, de 30.40% en el sistema de calefacción, y de 24.07% para la generación de energía eléctrica. Por otro lado, Mousafarash [8] analiza la eficiencia energética y exergética y las emisiones de bióxido de carbono en un sistema que genera electricidad calor y frío. El autor menciona que la variación de la temperatura de entrada a la turbina es un parámetro muy importante. Cuando este incrementa, la salida de trabajo aumenta, así como la entrada de combustible y la eficiencia exergética del ciclo de cogeneración. Además, reporta que al aumentar la eficiencia isentrópica de la turbina, la eficiencia exergética del ciclo aumenta y las pérdidas disminuyen.

Similarmente, Arsalis y Alexandrou [9] realizan un análisis termoeconómico de una planta de gas natural licuado que produce refrigeración, calefacción y electricidad. El modelo se validó usando dos turbinas de gas comerciales como referencia. El modelo mostró que la eficiencia exergética varía según la temporada, siendo de 0.443 durante la operación en invierno, y de 0.395 durante la operación en verano. El valor promedio de la eficiencia de segunda ley es menor en un 25%, comparada con la eficiencia de un sistema convencional. Además, según los resultados del análisis, con el distrito de energía se puede obtener una reducción de las emisiones de CO₂ de aproximadamente un 38.9%, así como una disminución de energía primaria requerida de aproximadamente 41%, con respecto a sistemas convencionales.

Dentro de su estudio, Nguyen et al. [10] proporcionan un modelo de precios a través de un análisis termoeconómico en un sistema que suministra calefacción y refrigeración simultáneamente. El trabajo muestra cómo es la transferencia de exergía hacia el circuito del cliente, de acuerdo con la variación de la temperatura de calefacción y refrigeración. Esta temperatura también influye en los costos de producción de frío y de calor. Además, el autor menciona que el coste del producto varía dependiendo del método que se utilice, es decir si es método energético o exergético. En otro trabajo, Massimo [11] realiza un análisis termoeconómico de una planta de refrigeración convencional aplicando la teoría del coste exergético. En el análisis, el autor calcula el coste exergético de los flujos físicos que se interrelacionan en la estructura, y los compara con un ejemplo numérico, obteniendo resultados muy parecidos. El autor concluye que aplicar la teoría del coste exergético en plantas de refrigeración abre el camino para futuras investigaciones.

En otro estudio, Dobrovicescu et al. [12] analizan la destrucción de exergía y realizan un análisis exergoeconómico de un sistema de refrigeración. Los autores indican que el análisis exergoeconómico de un sistema de refrigeración revela que cualquier zona del sistema consume recursos y servicios exergéticos para su funcionamiento. Ellos también encuentran que la eficiencia exergética del sistema se ve más afectada por las pérdidas de presión generadas en el evaporador, comparadas con las del condensador. Temir y Bilge [13] presentan el análisis termoeconómico de un sistema de trigeneración, que está compuesto por un motor de combustión interna -MCI- a gas natural de 1900 kW, un enfriador de absorción de 1130 kW, y una caldera recuperadora de calor de 53.9 kg/s. Dentro de los resultados los autores encuentran que la eficiencia exergética de la planta es del 34%. De la exergía del combustible que ingresa a la planta, el 7% corresponde a pérdidas y el 58.5% se destruye. El motor a gas es responsable del 48.6% de esta irreversibilidad, mientras que la caldera de recuperación de calor destruye el 6%, y el enfriador de absorción destruye el 4%. Como recomendación del estudio, se indica que una de las acciones a implementar en el motor a gas es tratar de disminuir las irreversibilidades, aunque los costos de inversión se incrementen.

De acuerdo con la revisión de literatura, a través de los años diferentes investigadores han evaluado el desempeño de los sistemas CCHP en algunas regiones como Asia, Europa y Norte América, pero actualmente no se registran en la literatura consultada estudios relacionados con la evaluación del desempeño de estos sistemas aplicado a las condiciones del país. En este estudio se realiza un análisis termoeconómico del DTLA, utilizando la metodología de análisis termoeconómico desarrollada por Lozano y Valero [14], con el objetivo de determinar con confianza los costos de producción bajo condiciones reales de operación. Con esto se crea una herramienta para soportar el estudio de diferentes configuraciones técnicas que busquen determinar el mejor desempeño de la planta, y así poder garantizar a los clientes competitividad, confiabilidad y disponibilidad del servicio.

Dentro de los resultados del estudio se puede observar el impacto que tienen la temperatura y la humedad relativa del ambiente en el coste de la TR producida. Cuando se da un incremento en estas variables, el coste de la TR producida incrementa dado que, los motores de los compresores de los sistemas de compresión, los de los sistemas de bombeo, y los de los ventiladores de las torres de enfriamiento, requieren mayor electricidad para poder realizar su trabajo.

2. MÉTODO

2.1 Descripción del sistema

El DTLA es una planta donde se produce agua fría, la cual se distribuye vía tuberías subterráneas para los sistemas de aire acondicionado de los edificios clientes. Este tiene una capacidad instalada de 3600 TR y está compuesto por un sistema de cogeneración que trabaja permanentemente en sincronismo con la red eléctrica. Este sistema produce parte de la energía eléctrica requerida para su autoconsumo mediante una micro turbina de gas natural (mTG) de 1000 kW, mientras que la fracción restante de energía eléctrica la toma permanentemente de la red. Los gases de escape de la mTG se recalientan al pasar por un sistema de poscombustión, el cual está compuesto por un quemador de gas natural de 527 kW. La corriente caliente que sale del quemador es la fuente térmica para un sistema de refrigeración por absorción, con capacidad de 510 TR.

El distrito además cuenta con tres sistemas de refrigeración por compresión de vapor de amoniaco, de 1038 TR cada uno, una batería de bombas de agua helada y condensación, un sistema de torres de enfriamiento, y un sistema de control, necesarios para generar la energía térmica que requieren los sistemas de aire acondicionado de los clientes.

La mTG es marca Capstone, referencia C1000. Este sistema contiene 5 módulos de 200 kW, los cuales permiten variar la generación de energía eléctrica de acuerdo con las condiciones de demanda. El enfriador de absorción de marca YORK, modelo YWA-YX-180, es un equipo de doble efecto y flujo en serie que trabaja con una solución de bromuro de litio agua (LiBr/agua). El sistema de poscombustión funciona con un quemador en vena de gas natural marca LV Airflow, sin aire de requema. Este se encarga de complementar la energía térmica que existe en los gases de escape del sistema de generación, y la dirige como fuente de alimentación hacia el generador de alta presión del sistema de refrigeración por absorción. El sistema de refrigeración por compresión de vapor de amoníaco consta de tres equipos de las mismas características, su marca es York, modelo Frick LZW-1800 y LZW-900. Los cuatro equipos de refrigeración tienen condensación por agua, por lo cual hay instaladas cuatro torres de enfriamiento marca PROTEC, modelo FWS, para cada uno de los equipos. Cada uno de los enfriadores utiliza un equipo de bombeo en el sistema de evaporación y uno en el de condensación. Estas bombas son marca Armstrong, y en cada caso existen dos bombas, una de trabajo continuo y una de stand-by.

Tanto la mTG, como los sistemas de refrigeración, los sistemas de bombeo y los ventiladores de las torres de enfriamiento, son modulares o tienen un flujo variable. Esto con el fin de obtener el mayor desempeño de la planta, el cual obedece a la demanda de energía térmica y eléctrica que se presente. Como se menciona en [4], un análisis termoeconómico para un sistema térmico se puede abordar de manera autónoma o de manera estructural. En la primera se aborda el sistema de manera conjunta analizando las corrientes de entrada y de salida, mientras que, en el segundo, se abordan y analizan las corrientes de flujo de entrada y de salida en cada uno de los componentes que integran el sistema. Para un análisis termoeconómico basado en la teoría estructural, es necesario definir una representación matemática de la estructura productiva.

El procedimiento de análisis general basado en la teoría estructural termoeconómica está dado por: 1) Determinación de la estructura física de la planta analizada, 2) Determinación de la estructura productiva de la planta, a partir de su estructura física, (definición del recurso y producto de cada subsistema de la planta), y 3) Aplicación del análisis termoeconómico [7]. El análisis termoeconómico distingue entre los costos exergéticos y los costos exergoeconómicos. El coste exergético de un flujo representa la cantidad de recursos externos que se usan para producir éste, y el coste exergoeconómico se define como la cantidad de dinero que se requiere para generar un flujo de energía [7].

En este estudio se utilizó el método estructural, tomando como insumo el análisis termodinámico y económico realizado para los componentes principales del distrito: sistema de compresión, sistema de absorción, y sistema de generación de electricidad con mTG. Después se acoplan estos modelos para obtener el modelo termoeconómico del distrito completo. Por último, se realiza un análisis de sensibilidad, variando las condiciones exteriores (temperatura de bulbo seco y humedad relativa). Los cálculos correspondientes al análisis termodinámico se implementan en el programa informático Engineering Equation Solver (EES).

2.2 Análisis termodinámico del DTLA

Como ya se ha mencionado para plantear un modelo termoeconómico es necesario primero contar con un análisis de primera y segunda ley de la termodinámica del sistema a evaluar. En este numeral se realiza el análisis de primera y segunda ley del distrito, integrando los tres equipos de compresión, el sistema de generación de energía eléctrica con mTG, el sistema de absorción, el quemador a gas natural, la subestación de electricidad, las tuberías de agua de suministro y retorno, la bomba del anillo secundario, y la estación de transferencia de energía -ETS-. Dentro de este sistema se considera el análisis individual y detallado en algunos casos, similar al realizado en otros estudios, para los equipos principales del distrito. A continuación, se mencionan algunas hipótesis consideradas para el análisis termodinámico:

- Se considera que el sistema opera en estado estacionario.
- El aire, los gases de combustión y el gas natural se toman como gases ideales.
- El poder calorífico inferior del gas natural PCI, se estima con la composición química aportada por la empresa Transportadora de Gas Internacional -TGI- en el punto Sebastopol - Antioquia [15]. Su valor es de $51795 \frac{kJ}{m^3}$, a una presión de 5.5 bar.
- La densidad del gas natural según composición de Sebastopol - Antioquia y a una presión de 5.5 bar es: $3.98 \frac{kg}{m^3}$
- La relación entre la exergía química y el PCI del gas natural se toma como el valor típico para el gas natural como: $\varphi_{GN} = 1.04$ [16].
- Se desprecian las pérdidas o ganancias de calor, presión y exergía en los segmentos de tubería que conectan los componentes.
- Para el cálculo de la exergía, se desprecian los cambios de la energía cinética y potencial.
- La presión y temperatura de referencia (estado muerto) se toman como 1.013 bar y 25 °C.

- Se considera que el condensador pierde calor, y que el evaporador gana calor, ambos mediante convección libre.
- La temperatura superficial se toma igual en todas las caras del condensador.
- La temperatura superficial se toma igual en todas las caras del evaporador.
- Los sistemas de tuberías de suministro y retorno de agua, el quemador a gas natural, la subestación de energía eléctrica, el sistema de bombeo del anillo secundario, y la ETS se consideran adiabáticos.

En la Figura 1 se presenta un esquema del DTLA. Además, de acuerdo con el análisis termodinámico, en la Tabla 1 se muestran las propiedades termodinámicas de los diferentes flujos que interactúan en el sistema, y en la Tabla 2 se presentan las irreversibilidades arrojadas para cada componente.

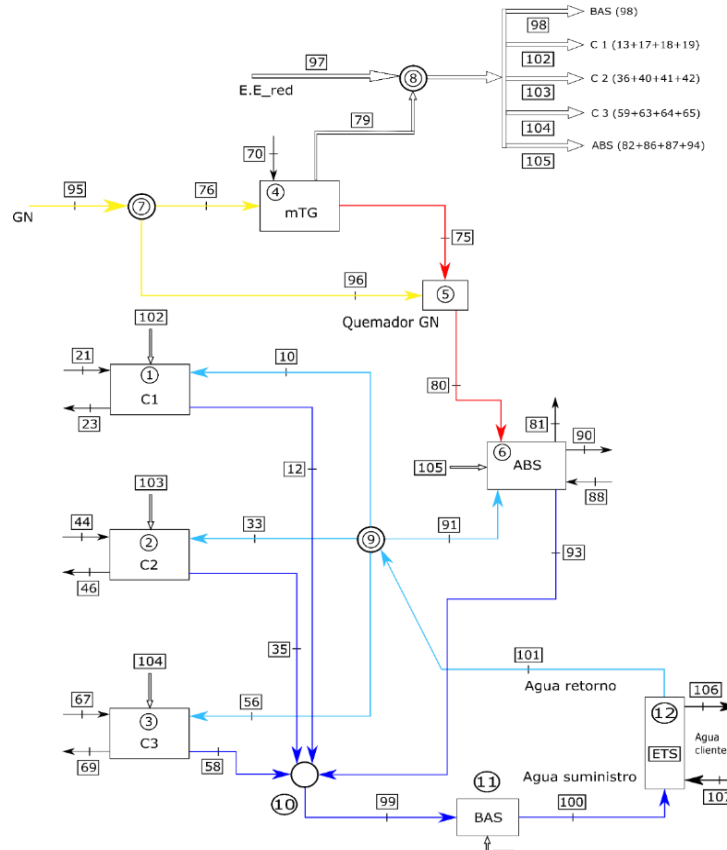


Figura 1. Estructura física del distrito térmico DTLA

Tabla 54. Propiedades termodinámicas del DTLA

Flujo	T [C]	P [bar]	\dot{m} [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	e [kJ/kg]	\dot{E} [kJ/s]	Flujo	T [C]	P [bar]	\dot{m} [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	e [kJ/kg]	\dot{E} [kJ/s]
10	-	-	120	-	-	-	147.4	88	-	-	1.3	105.3	-	-	0.5556
12	-	-	120	-	-	-	361.3	90	-	-	73.47	-	-	-	1.88
21	-	-	1.25	105.3	-	-	0.56	91	-	-	59	-	-	-	72.48
23	-	-	92.9	-	-	-	2.38	93	-	-	59	-	-	-	177.6
33	-	-	120	-	-	-	147.4	95	25	5.5	0.06096	-	-	-	3284
35	-	-	120	-	-	-	361.3	96	18	4	0.0109	51795	-	-	587.2
44	-	-	1.25	105.3	-	-	0.56	97	-	-	-	-	-	-	1252
46	-	-	92.9	-	-	-	2.38	98	-	-	-	-	-	-	129.8
56	-	1.5	120	-	-	-	147.4	99	5	0.57	419	21.08	0.07625	2.913	1214
58	-	0.57	120	-	-	-	361.3	100	5	3.5	419	21.37	0.07625	3.191	1337
67	-	-	1.25	105.3	-	-	0.56	101	12.22	1.5	419	51.43	0.1836	1.229	514.8
69	-	-	92.9	-	-	-	2.38	102	-	-	-	-	-	-	612.2
70	-	-	5.006	-	-	-	0	103	-	-	-	-	-	-	612.2
75	290	-	5.056	273.2	-	-	419.7	104	-	-	-	-	-	-	612.2
76	-	-	0.05006	51795	-	-	2697	105	-	-	-	-	-	-	55.88
79	-	-	-	-	-	-	770.3	106	6	2	428.4	25.42	0.09132	2.747	1177
80	390	-	5.067	384.1	-	-	676	107	13	2.8	428.4	54.82	0.1951	1.217	521.5
81	-	-	5.067	-	-	-	140.4								

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el componente que presenta mayor irreversibilidad es la micro turbina. Del total de irreversibilidades en este componente, el 77% están asociadas a la cámara de combustión. Estas irreversibilidades se deben al proceso de combustión, así como a la diferencia de temperatura con las que se mezclan

en su interior el aire a presión y el gas natural. Después de la micro turbina, los componentes con mayor irreversibilidad son los sistemas de refrigeración. De los cuatro sistemas, el sistema de absorción tiene la mayor irreversibilidad. Esto puede estar asociado con las diferencias de temperatura entre los fluidos que interactúan en los intercambiadores de calor, y con las pérdidas por fricción. Los enfriadores de compresión también presentan irreversibilidades significativas, las cuales se pueden originar, entre otras cosas, por las diferencias de temperatura entre el fluido caliente y el frío.

Tabla 2. Irreversibilidades de los componentes del DTLA

#	Componente	I [kJ/s]
1	Enfriador compresión C1	396.4
2	Enfriador compresión C2	396.4
3	Enfriador compresión C3	396.4
4	Micro turbina	1507
5	Quemador a gas natural	330.9
6	Enfriador absorción	485
7	Cámara de separación gas natural	0.00
8	Subestación de electricidad	0.17
9	Cámara de mezcla agua retorno	0.0805
10	Cámara de mezcla agua suministro	47.44
11	Bombeo anillo secundario	7.01
12	Estación transferencia energía	166.9

2.3 Estructura física del distrito térmico DTLA

El análisis termoeconómico de este estudio utiliza datos de los análisis termodinámicos desarrollados para los sistemas principales del DTLA, los cuales son: sistema de compresión, micro turbina de gas natural, y enfriador de absorción. Como ya se mencionó, el DTLA cuenta con tres sistemas de compresión con especificaciones técnicas iguales. Por esto, se realizó el modelo termoeconómico para uno de los equipos, y en el modelo termoeconómico completo se aplican estos resultados para cada uno de los sistemas de compresión. Dentro del modelo completo se nombran los sistemas de compresión como C1, C2 y C3. En el análisis individual de los sistemas de compresión y absorción se incluyeron los equipos complementarios que el sistema requiere para producir el agua fría: los sistemas de bombeo del evaporador y condensador y la torre de enfriamiento. En el modelo del DTLA completo se representan los sistemas compresión y absorción sin estos elementos complementarios, pero sus flujos de trabajo eléctrico se suman y se representan como un solo flujo. Para el caso de la torre de enfriamiento, solo se indican en el sistema completo los flujos de agua de reposición y el vapor de agua que evacúa este sistema.

Con la estructura física de un sistema se busca ilustrar cada uno de sus componentes, así como los diferentes flujos que entran y salen de éstos. El nivel de agregación adecuado elegido debe tener en cuenta que el análisis termoeconómico comenzará a partir de los datos medidos y/o simulados, tales como temperaturas, presiones, flujos másicos, y composiciones químicas de todos los flujos de materia y energía del sistema. Cada componente y flujo de masa y energía se enumera en la estructura física [7]. En la Figura 1 se ilustra la estructura física del sistema DTLA.

Como aspecto a resaltar se tiene que la subestación de energía eléctrica es un componente que cuenta con dos recursos, el flujo 97 (electricidad de la red) y el flujo 79 (electricidad generada por la mTG). Además, ésta cuenta con un producto compuesto de cinco flujos: flujo 98 (trabajo eléctrico bomba del anillo secundario), flujo 102 (compila flujos de trabajo eléctrico relacionados con el equipo de compresión C1), flujo 103 (compila flujos de trabajo eléctrico relacionados con el equipo de compresión C2), flujo 104 (compila flujos de trabajo eléctrico relacionados con el equipo de compresión C3), y el flujo 105 (compila los flujos de trabajo eléctrico relacionados con el equipo de absorción). En el sistema de condensación de los sistemas de refrigeración se representan los flujos de agua de reposición en la torre de enfriamiento y el flujo de vapor de agua que expulsa la torre.

2.4 Estructura productiva del distrito DTLA

En este paso se indican los recursos y productos asociados a cada uno de los componentes. Se considera un recurso aquello que se debe invertir, en términos de exergía, para obtener un producto deseado. El producto, por el contrario, es lo que se desea obtener de un componente cualquiera, en términos exergéticos. El recurso de un componente puede ser el producto de otros y el producto de un componente puede ser el recurso de varios componentes [17]. La estructura productiva proporciona al analista una nueva perspectiva del sistema. En la Tabla 3 se presenta la estructura productiva del sistema DTLA completo.

2.5 Análisis termoeconómico del distrito de enfriamiento DTLA

La cantidad de exergía necesaria para obtener los productos es igual a la exergía de los recursos consumidos. Esta idea permite la introducción del concepto de coste exergético. Dado un sistema cuyos límites, nivel de desagregación,

y el objetivo de producción de los subsistemas se han definido, se denomina coste exergético (\dot{C}_i) de un flujo físico, a la cantidad de exergía necesaria para producir dicho flujo. El coste de un flujo es una propiedad emergente, es decir, no existe como una propiedad termodinámica separada del flujo. El coste siempre está relacionado con el proceso de producción [17]. El resultado final de este análisis termoeconómico, es hallar el coste total de la TR producida por el sistema, es decir, el coste termoeconómico del producto del componente 12 (ETS).

Tabla 3. Estructura productiva del distrito de enfriamiento DTLA

#	Componente	Recurso	Producto
1	Enfriador compresión C1	$\dot{E}_{21} + \dot{E}_{102}$	$(\dot{E}_{12} - \dot{E}_{10}) + \dot{E}_{23}$
2	Enfriador compresión C2	$\dot{E}_{44} + \dot{E}_{103}$	$(\dot{E}_{35} - \dot{E}_{33}) + \dot{E}_{46}$
3	Enfriador compresión C3	$\dot{E}_{67} + \dot{E}_{104}$	$(\dot{E}_{58} - \dot{E}_{56}) + \dot{E}_{69}$
4	Micro turbina	$\dot{E}_{70} + \dot{E}_{76}$	$\dot{E}_{75} + \dot{E}_{79}$
5	Quemador de gas natural	$\dot{E}_{75} + \dot{E}_{96}$	\dot{E}_{80}
6	Enfriador absorción	$(\dot{E}_{80} - \dot{E}_{81}) + \dot{E}_{88} + \dot{E}_{105}$	$(\dot{E}_{93} - \dot{E}_{91}) + \dot{E}_{90}$
7	Cámara separación gas natural	\dot{E}_{95}	$\dot{E}_{76} + \dot{E}_{96}$
8	Subestación de electricidad	$\dot{E}_{79} + \dot{E}_{97}$	$\dot{E}_{98} + \dot{E}_{102} + \dot{E}_{103} + \dot{E}_{104} + \dot{E}_{105}$
9	Cámara mezcla agua retorno	\dot{E}_{101}	$\dot{E}_{10} + \dot{E}_{33} + \dot{E}_{56} + \dot{E}_{91}$
10	Cámara mezcla agua suministro	$\dot{E}_{12} + \dot{E}_{35} + \dot{E}_{58} + \dot{E}_{93}$	\dot{E}_{99}
11	Bombeo anillo secundario	\dot{E}_{98}	$\dot{E}_{100} - \dot{E}_{99}$
12	Estación transferencia energía	$\dot{E}_{100} - \dot{E}_{101}$	$\dot{E}_{106} - \dot{E}_{107}$

2.5.1 Cálculo de costos exergéticos [17]

La teoría del coste exergético se basa en el balance de costos de cada componente, a partir de la matriz de incidencia A , la cual representa la estructura física del sistema. Con esto se obtienen n ecuaciones (tantas como componentes tenga el sistema). Sin embargo, hace falta tener m ecuaciones, ya que se debe obtener el coste de los m flujos del sistema. Generalmente $m > n$, por lo que hacen falta $m - n$ ecuaciones para resolver el problema. Estas ecuaciones se conocen como ecuaciones auxiliares. Las $m - n$ ecuaciones necesarias se obtienen a partir de cuatro proposiciones que se plantean en la teoría del coste exergético [14],[17].

En el distrito de enfriamiento DTLA se tienen $n = 12$ componentes (enumerados en la Fig. 1 desde el 1 hasta el 12) y $m = 35$ flujos (enumerados en la estructura física desde el 10 hasta el 107). Dada esta configuración, se tiene la matriz de incidencia (Matriz A), de orden (12×35) , con base en esto, es necesario construir la matriz de ecuaciones auxiliares (Matriz α), la cual será de orden (23×35) . Luego se combinan las matrices A y α , para obtener la matriz de costos (A). Con esto, se puede plantear el sistema con la ecuación (1), de acuerdo con [14].

$$A \dot{C} = \mathbb{Y} \quad (1)$$

El vector \mathbb{Y} tiene dimensión $(m \times 1)$. Sus primeros n elementos son iguales a cero. Los elementos restantes de este vector se denotan como ω_i , y su valor se determina usando las proposiciones de la teoría del coste exergético [14]. En la Tabla 4, se presentan las ecuaciones consideradas en la matriz α .

Tabla 4. Ecuaciones auxiliares distrito de enfriamiento DTLA

Proposición 1. Recursos externos	Flujo 21	$\dot{E}_{21} = \dot{C}_{21}, \omega_1 = \dot{E}_{21}$
	Flujo 24	$\dot{E}_{44} = \dot{C}_{44}, \omega_2 = \dot{E}_{44}$
	Flujo 67	$\dot{E}_{67} = \dot{C}_{67}, \omega_3 = \dot{E}_{67}$
	Flujo 88	$\dot{E}_{88} = \dot{C}_{88}, \omega_4 = \dot{E}_{88}$
	Flujo 95	$\dot{E}_{95} = \dot{C}_{95}, \omega_5 = \dot{E}_{95}$
	Flujo 97	$\dot{E}_{97} = \dot{C}_{97}, \omega_6 = \dot{E}_{97}$
	Flujo 70	$\dot{E}_{70} = \dot{C}_{70}, \omega_7 = \dot{E}_{70}$
	Flujo 107	$\dot{E}_{107} = \dot{C}_{107}, \omega_8 = \dot{E}_{107}$
Proposición 3. Recursos en <i>doublet</i>	Enfriador de absorción	$\dot{C}_{80} - x_{22} \cdot \dot{C}_{81} = 0, x_{22} = \frac{\dot{E}_{80}}{\dot{E}_{81}}, \omega_{22} = 0$
	Estación de transferencia de energía	$\dot{C}_{100} - x_{23} \cdot \dot{C}_{101} = 0, x_{23} = \frac{\dot{E}_{100}}{\dot{E}_{101}}, \omega_{23} = 0$

Preposición 4. Productos múltiples	Micro turbina a GN	$\dot{C}_{75} - x_9 \cdot \dot{C}_{79} = 0, x_9 = \frac{\dot{E}_{75}}{\dot{E}_{79}}, \omega_9 = 0$
	Cámara de distribución GN	$\dot{C}_{12} - x_{10} \cdot \dot{C}_{96} = 0, x_{10} = \frac{\dot{E}_{76}}{\dot{E}_{96}}, \omega_{10} = 0$
	Compresión C1	$\dot{C}_{12} - \dot{C}_{10} - x_{11} \dot{C}_{23} = 0, x_{11} = \frac{\dot{E}_{12} - \dot{E}_{10}}{\dot{E}_{23}}, \omega_{11} = 0$
	Compresión C2	$\dot{C}_{35} - \dot{C}_{33} - x_{12} \dot{C}_{46} = 0, x_{12} = \frac{\dot{E}_{35} - \dot{E}_{33}}{\dot{E}_{46}}, \omega_{12} = 0$
	Compresión C3	$\dot{C}_{58} - \dot{C}_{56} - x_{13} \dot{C}_{69} = 0, x_{13} = \frac{\dot{E}_{58} - \dot{E}_{56}}{\dot{E}_{69}}, \omega_{13} = 0$
	Enfriador absorción	$\dot{C}_{93} - \dot{C}_{91} - x_{14} \dot{C}_{90} = 0, x_{14} = \frac{\dot{E}_{93} - \dot{E}_{91}}{\dot{E}_{90}}, \omega_{14} = 0$
	Subestación electricidad	$\dot{C}_{98} - x_{15} \cdot \dot{C}_{102} = 0, x_{15} = \frac{\dot{E}_{98}}{\dot{E}_{102}}, \omega_{15} = 0$
		$\dot{C}_{102} - x_{16} \cdot \dot{C}_{103} = 0, x_{16} = \frac{\dot{E}_{102}}{\dot{E}_{103}}, \omega_{16} = 0$
		$\dot{C}_{103} - x_{17} \cdot \dot{C}_{104} = 0, x_{17} = \frac{\dot{E}_{103}}{\dot{E}_{104}}, \omega_{17} = 0$
		$\dot{C}_{104} - x_{18} \cdot \dot{C}_{105} = 0, x_{18} = \frac{\dot{E}_{104}}{\dot{E}_{105}}, \omega_{18} = 0$
	Cámara agua de retorno	$\dot{C}_{10} - x_{19} \cdot \dot{C}_{33} = 0, x_{19} = \frac{\dot{E}_{10}}{\dot{E}_{33}}, \omega_{19} = 0$
		$\dot{C}_{33} - x_{20} \cdot \dot{C}_{56} = 0, x_{20} = \frac{\dot{E}_{33}}{\dot{E}_{56}}, \omega_{20} = 0$
		$\dot{C}_{56} - x_{21} \cdot \dot{C}_{91} = 0, x_{21} = \frac{\dot{E}_{56}}{\dot{E}_{91}}, \omega_{21} = 0$

2.5.2 Costos termoeconómicos del DTLA

El coste termoeconómico de un flujo es la suma de dos contribuciones: una que procede del coste monetario de la exergía de entrada a la planta, necesaria para producir dicho flujo, y otra que engloba el resto de los costos económicos originados en el proceso productivo, y asociados a su obtención [18]. La finalización exitosa de un proyecto de diseño térmico requiere una estimación de los principales costos involucrados en el proyecto.

Además de los costos termodinámicos, los cuales están asociados a los productos y recursos de cada uno de los componentes del sistema, se tienen los costos no termodinámicos, los cuales están relacionados con los costos totales de inversión del proyecto y con los costos de operación y mantenimiento. Los costos no termodinámicos se distribuyen entre todos los componentes del sistema y se dan por unidad de tiempo. Los autores [6], [19] y [20] sugieren la ecuación (2) para hallar de forma simplificada los costos no termodinámicos para los componentes del sistema.

$$\dot{Z}_k = \frac{\varphi_k \cdot f \cdot PEC_k}{N} \quad (2)$$

Donde:

- φ Factor de mantenimiento
- f Factor de anualidad
- PEC Coste de los equipos comprados
- N Tiempo de operación anual de la planta $\left[\frac{h}{\text{año}} \right]$

El factor de anualidad se puede hallar con las ecuaciones (3) y (4), según [6], [19]:

$$f = \left[\frac{q^{(a+b)-1}}{(q-1)q^{(a+b)}} - \frac{q^{b-1}}{(q-1)q^b} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$q = \left(1 + \frac{in}{100} \right) \left(1 + \frac{ri}{100} \right) \quad (4)$$

Donde:

- a Vida útil de la planta [años]
- b Duración de construcción de la planta [años]
- in Tasa de interés efectiva anual por la deuda $\left[\frac{\%}{\text{año}} \right]$
- ri Tasa de inflación anual $\left[\frac{\%}{\text{año}} \right]$

A continuación, se listan las consideraciones usadas para hallar los costos no termodinámicos del sistema de enfriamiento DTLA:

- Factor de mantenimiento $\varphi = 1.06$
- Horas de operación del sistema al año = 8640 h/año
- Vida útil de la planta, $a = 15$ años
- Período de construcción de la planta, $b = 2.5$ años
- Tasa de interés $in = 0$ (no existe deuda)
- Tasa de inflación anual $ri = 5\%$
- Factor de anualidad $f = 0.1088 \%$ /año

2.5.3 Coste de adquisición de los equipos

Estos costos se conocen como *PEC*, por su sigla en inglés (Purchased Equipment Cost). Se pueden determinar directamente mediante cotizaciones o datos de fabricantes de equipos industriales. El *PEC* para los componentes del sistema de enfriamiento DTLA se toma directamente como el precio real de éstos, el cual se tomó del plan de negocio del proyecto. El suministro de los equipos y la construcción del proyecto se realizaron entre los años 2015 y 2016. En la Tabla 5, se presentan los precios de compra de los componentes del DTLA. Se debe mencionar que algunos componentes se compraron a nivel nacional y otros componentes fueron importados. Estos últimos se pagaron a una TRM de \$3000 (pesos colombianos).

Tabla 5. Precio de los diferentes componentes del sistema de enfriamiento DTLA

Ítem	Componente	PEC (USD)
1	Enfriador compresión C1	1,063.926.28
2	Enfriador compresión C2	1,063.926.28
3	Enfriador compresión C3	1,063.926.28
4	Microturbina gas natural	1,484.888.00
5	Quemador gas natural	40,000.00
6	Enfriador absorción	839,486.28
7	Cámara de gas natural	55,028.86
8	Subestación de energía eléctrica	995,658.15
9	Anillo agua retorno	914,066.67
10	Anillo agua suministro	551,699.76
11	Bombeo distribución agua fría	155,821.64
12	Estación de transferencia -ETS-	1,339.146.67
13	Sistema de control	783,668.39
14	Obra civil	4,992.832.66
15	Consultoría y acompañamiento	101,010.94
16	Otros (contingencias)	1,888.246.48
	Total DTLA	17,333.333.33

Como se puede apreciar en la Tabla 5, existen algunos costos que, si bien son necesarios para la producción de la energía térmica que produce el DTLA, no hacen parte del sistema termodinámico, pero sí del modelo económico. Teniendo en cuenta esta situación, se adicionan de manera proporcional los costos 13, 14, 15 y 16 al resto de los doce componentes, con el fin de considerar dentro del modelo económico todos los costos del sistema. Esto se realiza primero obteniendo un $\dot{Z}_{asociado}$ a los PEC_{13} , PEC_{14} , PEC_{15} y PEC_{16} .

Luego se halla la fracción del precio de cada componente, $f_{otros} = PEC_1 / suma (PEC_1 \dots PEC_{12})$, y por último se multiplica cada f por el *PEC* de su respectivo componente (del 1 al 12), obteniendo así el PEC_{total} por cada componente. A continuación, en las ecuaciones (5), (6) y (7) se presenta un ejemplo de cómo se estimó el PEC_{total} para cada componente. Suma de costos termodinámicos considerados (componentes 1-12 de la Tabla 5), total = 9,567.574.85 y Suma de costos no termodinámicos considerados (componentes 13-16 de la Tabla 5), total = 7,765.758.48.

$$f_{C1} = \frac{1,063.926.28}{9,567.574.85} \quad (5)$$

$$\dot{Z}_{asociado} = 7,765.758.48 \quad (6)$$

$$PEC_{total,C1} = 1,063.926.28 + (f_{C1} \times \dot{Z}_{asociado}) \quad (7)$$

Este último *PEC* es el que se utiliza en el modelo termoeconómico, y refleja los costos totales del proyecto. En la Tabla 6 se presenta el PEC_{total} en USD, considerado en el modelo termoeconómico del sistema DTLA.

Tabla 6. PEC_{total} componentes del sistema de enfriamiento DTLA

Ítem	Componente	PEC_{total}
1	Enfriador compresión C1	1,927.488.33
2	Enfriador compresión C2	1,927.488.33
3	Enfriador compresión C3	1,927.488.33
4	Microturbina gas natural	2,690.134.03
5	Quemador gas natural	72,466.99
6	Enfriador absorción	1,520.876.06
7	Cámara de gas natural	99,694.39
8	Subestación de energía eléctrica	1,803.808.68
9	Anillo agua retorno	1,655.991.46
10	Anillo agua suministro	999,500.49
11	Bombeo distribución agua fría	282,298.12
12	Estación de transferencia -ETS-	2,426.098.14

2.6 Efecto de las condiciones ambientales (temperatura de bulbo seco y humedad relativa) en la operación y costos del DTLA

El DTLA interactúa de forma directa con el ambiente mediante los siguientes componentes:

- Torres de enfriamiento.
- Condensador de cada enfriador.
- Evaporador de cada enfriador.

En las torres de enfriamiento la interacción se da por:

- Temperatura de agua de reposición.
- Temperatura, humedad relativa y flujo del aire que entra.
- Temperatura del agua que sale del condensador del enfriador.

La interacción de los condensadores se da por:

- Pérdidas de calor directas al ambiente, a través de la superficie del componente: $\dot{Q}_{per,cond}$
- Temperatura del agua que entra: está afectada de forma indirecta por las condiciones ambientales

En los evaporadores la interacción es por:

- Ganancia de calor desde el ambiente, a través de la superficie fría: $\dot{Q}_{gan,evap}$

Teniendo en cuenta las condiciones ambientales, se procede a ejecutar el modelo termodinámico del DTLA considerando cinco temperaturas exteriores (18, 21, 24, 27 y 30 °C), y variando la humedad relativa del ambiente y la del vapor de agua que expulsa la torre de enfriamiento. El análisis de sensibilidad del sistema consiste en recoger las exergías de algunos equipos principales (compresión, sistema de generación de energía mTG, y sistema de absorción), determinadas en los análisis individuales de los sistemas al variar las mismas condiciones ambientales. En los sistemas analizados se trabaja la capacidad de generación del equipo constante, mientras se modifican otras variables. Dentro de los objetivos del análisis de sensibilidad está el observar como varían parámetros relevantes de la planta, como potencia requerida por cada enfriador, potencia que se toma de la red eléctrica, COP y eficiencia de segunda ley del sistema, costos exergéticos y exergoeconómicos, y el coste de producción de la TR producida en la planta. Para el análisis termodinámico del DTLA variando las condiciones ambientales se tienen en cuenta las hipótesis consideradas en el numeral 2.2. De éstas, se modifican las siguientes:

- La presión de referencia o presión ambiente para Medellín es $P_{amb} = 0.854 \text{ BAR}$
- Se trabaja la temperatura ambiente $T_{amb} = 18, 21, 24, 27 \text{ y } 30 \text{ }^\circ\text{C}$.
- La humedad relativa ambiente se varía en función de la temperatura: $\varphi_{amb} = 1.2346 - 0.02692 \times T_{amb}$. Esta correlación se obtuvo a partir de datos medidos en el DTLA.
- La densidad del aire de salida de las torres de refrigeración se calcula en función de su temperatura, presión, y humedad relativa.

La pérdida o ganancia de calor en los intercambiadores de evaporación y condensación de los sistemas de compresión está dada por la Ecuación (8) de acuerdo con la referencia [21]:

$$\dot{Q}_{per, gan} = \bar{h} * A * (T_s - T_\infty) \quad (8)$$

Donde:

\bar{h} coeficiente medio de transferencia de calor

A Área de transferencia

T_s Temperatura de superficie del área en revisión

T_∞ Temperatura ambiente

Las áreas superficiales del condensador y del evaporador se estiman a partir de las dimensiones reales de cada uno de los intercambiadores de calor tomadas en campo. Las dimensiones de éstos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Dimensiones condensador y evaporador del sistema de refrigeración por compresión

Intercambiadores sistema de compresión [m]			
Componente	Ancho	Alto	Largo
Condensador	0.81	2.2	1.52
Evaporador	0.81	1.75	1.05

La temperatura de las superficies del condensador para los sistemas de refrigeración por compresión se calcula como el promedio entre la temperatura de entrada de refrigerante caliente, y la de entrada de agua fría a estos componentes. Como ejemplo, para el sistema compresión C1 se tiene la ecuación (9).

$$T_{s,cond} = \frac{T_2 + T_{15}}{2} \quad (9)$$

En el caso de los evaporadores de los sistemas de refrigeración por compresión, su temperatura superficial se calcula como el promedio entre la temperatura de entrada del refrigerante frío, y la del agua tibia. Como ejemplo, para el sistema compresión C1 se tiene la ecuación (10).

$$T_{s,evap} = \frac{T_{11} + T_8}{2} \quad (10)$$

En el ventilador de la torre de enfriamiento, el trabajo eléctrico a carga parcial se estima a partir del trabajo máximo y del máximo volumen de vapor de agua que expulsa la torre (datos sacados de catálogo). Como ejemplo, para el sistema de compresión C1 se considera la ecuación (11), de acuerdo con lo que se propone en la referencia [22].

$$\frac{\dot{W}_{17}}{W_{17,max}} = 0.455 \left(\frac{\dot{V}_{23}}{V_{23,max}} \right)^3 - 0.227 \left(\frac{\dot{V}_{23}}{V_{23,max}} \right)^2 + 0.885 \left(\frac{\dot{V}_{23}}{V_{23,max}} \right) - 0.116 \quad (11)$$

Donde:

$\dot{W}_{17,max}$ Trabajo a plena carga consumido por el ventilador de la torre de enfriamiento

$\dot{V}_{23,max}$ Vapor de agua expulsado por la torre a plena carga

\dot{V}_{23} Vapor de agua expulsado por la torre a carga parcial

\dot{W}_{17} Trabajo eléctrico requerido por ventilador de la torre a carga parcial

3. RESULTADOS

Como se puede observar en la Tabla 8, la corriente que tiene el coste exergético unitario más alto del sistema es el agua fría que produce el enfriador de absorción (flujo 93). El coste de esta corriente en los equipos de compresión también es uno de los más altos, pero es menor que la del enfriador de absorción. Esto se debe en gran parte al COP del enfriador por absorción, dado que éste requiere mayor energía para producir la TR, comparado con los sistemas de compresión.

Tabla 8. Costos exergéticos y exergoeconómicos del distrito de enfriamiento DTLA

Flujo	\dot{C}_{ex} (kW)	c_{ex} (kW/kW)	C (USD/h)	c (cUSD/kWh)	Flujo	\dot{C}_{ex} (kW)	c_{ex} (kW/kW)	C (USD/h)	c (cUSD/kWh)
10	753.20	5.11	89.76	60.89	88	0.56	1.00	2.42	435.00
12	1658.22	4.59	201.72	55.83	90	9.30	4.95	0.52	27.65
21	0.56	1.00	2.44	435.00	91	370.36	5.11	44.14	60.89
23	3.02	1.27	0.37	15.71	93	1663.27	9.37	116.42	65.55
33	753.20	5.11	89.76	60.89	95	3284.00	1.00	83.79	2.55
35	1658.22	4.59	201.72	55.83	96	587.16	1.00	15.22	2.59
44	0.56	1.00	2.44	435.00	97	1252.00	1.00	185.42	14.81
46	3.02	1.27	0.37	15.71	98	192.41	1.48	17.84	13.75
56	753.20	5.11	89.76	60.89	99	6637.92	5.47	734.92	60.54
58	1658.22	4.59	201.72	55.83	100	6830.33	5.11	756.53	56.58
67	0.56	1.00	2.44	435.00	101	2629.96	5.11	291.30	56.58
69	3.02	1.27	0.37	15.71	102	907.48	1.48	84.16	13.75
70	0.00	1.00	0.00	0.00	103	907.48	1.48	84.16	13.75
75	951.14	2.27	37.32	8.89	104	907.48	1.48	84.16	13.75
76	2696.84	1.00	69.90	2.59	105	82.83	1.48	7.68	13.75
79	1745.69	2.27	68.50	8.89	106	4721.87	4.01	1237.93	105.18
80	1538.31	2.28	53.51	7.92	107	521.50	1.00	740.30	141.96
81	319.49	2.28	11.11	7.92					

El segundo flujo que tiene mayor coste unitario es la corriente de agua fría (flujo 99), el cual es producto del componente 10 (cámara de mezcla agua suministro). Esta corriente es prácticamente el producto final de la planta completa. Por esta razón se puede pensar que tenga un coste tan elevado, dado que este producto incorpora las irreversibilidades de la gran mayoría de componentes de la planta. Dentro del análisis termoeconómico se observa que la corriente con mayor coste termoeconómico unitario es el agua que se debe reponer en la torre de enfriamiento de cada enfriador (flujos 21, 44, 67 y 88). El coste de las corrientes que son el producto final de la planta (flujos 106 y 107), son los que tienen en segundo lugar el coste más alto del sistema.

Después de hallar los costos termoeconómicos del DTLA para unas condiciones de referencia (estado muerto), se halla el coste del producto final (TR producida). Uno de los objetivos de este trabajo era poder llegar a tener, a partir de un análisis termoeconómico, el coste final de la tonelada de refrigeración producida en el distrito de enfriamiento DTLA. Este coste está relacionado directamente con el coste termoeconómico específico del producto en el componente 12 (ETS). En la Tabla 9, se muestran los costos termoeconómicos del recurso y del producto de cada uno de los componentes del DTLA. De esta forma se tiene que el coste final de la TR producida es de 75.92 *cUSD/kWh*.

Tabla 9. Costos termoeconómicos de recurso y producto de los componentes del DTLA

Componente	Recurso		Producto	
	C_F (USD/h)	c_F (cUSD/kWh)	C_P (USD/h)	c_P (cUSD/kWh)
1	86.60	14.13	112.33	51.94
2	86.60	14.13	112.33	51.94
3	86.60	14.13	112.33	51.94
4	69.90	2.59	105.82	8.89
5	52.54	5.22	53.51	7.92
6	52.49	8.87	72.80	68.04
7	83.79	2.55	85.12	2.59
8	253.92	12.56	278.01	13.75
9	291.30	56.58	313.41	60.89
10	721.57	57.20	734.92	60.54
11	17.84	13.75	21.61	17.57
12	465.24	56.58	497.63	75.92

Como lo presenta la Tabla 9, la cámara de mezcla de agua de retorno (componente 9) y la ETS (componente 12) son los componentes en los cuales el coste termoeconómico unitario de su recurso es el más alto del sistema. Ambos están relacionados directamente con el producto final del distrito. Como algo de esperarse, el componente con el coste termoeconómico unitario más alto en el producto es la ETS (componente 12). Este resultado se debe a que la ETS es el componente que aporta el producto final del sistema completo. En este coste se ven asociados los costos termoeconómicos de los demás componentes.

En la Figura 2, se observa como varía la potencia eléctrica que requiere un equipo de compresión y el enfriador de absorción (en el eje izquierdo la potencia del sistema de compresión y la potencia de la red, y en el eje derecho la potencia del equipo de absorción). Se debe tener en cuenta que el sistema completo reúne tres equipos de compresión de la misma capacidad y la misma referencia, mientras que la información de la figura ilustra la potencia que requiere un solo equipo de compresión: la bomba de su condensador, la de su evaporador, y el ventilador de su torre de enfriamiento. En la figura también se muestra la variación de la potencia del enfriador de absorción con la temperatura, así como la potencia que requiere el sistema DTLA permanentemente de la red eléctrica.

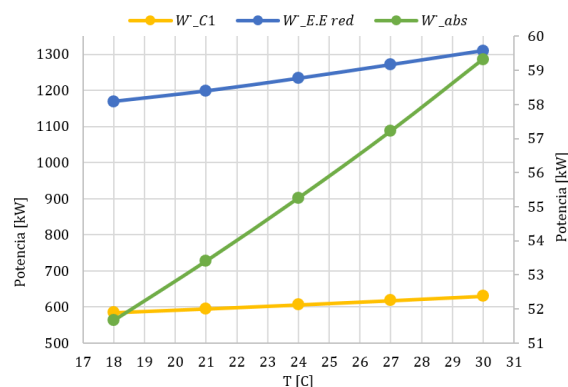


Figura 2. Potencia eléctrica requerida de la red y potencia de sistema de compresión y enfriador de absorción

Como se puede apreciar en la figura anterior, el enfriador de compresión y el de absorción del DTLA completo, experimentan un aumento del consumo de energía eléctrica en la medida que incrementa la temperatura ambiente. Esto se debe a que los motores de los sistemas de bombeo de condensación y de los ventiladores de las torres de enfriamiento circulan flujos mayores en la medida en que incrementa dicha temperatura. Además, la potencia que se

toma de la red también aumenta, dado que la potencia que genera la mTG es constante para todas las temperaturas, y como los enfriadores requieren mayor electricidad con el incremento de temperatura, este exceso se debe tomar permanentemente de la red eléctrica. En la Figura 3 se presentan los efectos de la temperatura ambiente en el desempeño y la eficiencia de segunda ley del distrito completo.

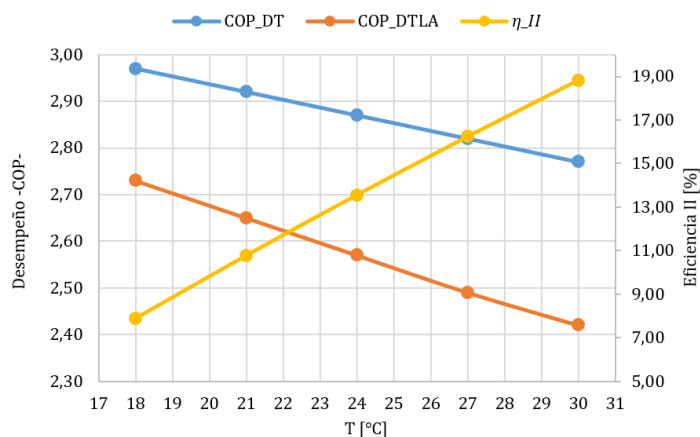


Figura 3. Coeficiente de desempeño y eficiencia de segunda ley del distrito de enfriamiento DTLA

En la figura se ilustran dos versiones del coeficiente de desempeño de la planta (eje izquierdo: COP_{DT} y COP_{DTLA} , y eje derecho: eficiencia de segunda ley). La primera, denominada COP_{DT} , solo incluye la potencia eléctrica requerida por el enfriador y no incluye el consumo eléctrico que requieren los sistemas complementarios (bombas de evaporación y condensación, y ventiladores de las torres de enfriamiento). Se observa como disminuye este coeficiente de desempeño con el aumento de temperatura ambiente, debido a que los enfriadores requieren más trabajo eléctrico para producir la misma cantidad de TR. La segunda versión, denominada COP_{DTLA} , representa el desempeño del distrito incluyendo el consumo eléctrico de enfriadores y sistemas complementarios. Este coeficiente disminuye más rápidamente con el aumento de temperatura ambiente, debido a que incluye la demanda de electricidad del coeficiente anterior, más la de los sistemas auxiliares, la cual también aumenta con la temperatura.

En la Figura 3, también se muestra que con la eficiencia de segunda ley (eje derecho) pasa lo contrario: a menor temperatura esta eficiencia es menor y en la medida que la temperatura incrementa la eficiencia de segunda ley también lo hace. Este comportamiento se debe a que tanto la carga de refrigeración como sus condiciones de presión y temperatura se mantienen constantes, mientras que la temperatura ambiente cambia, y con ella la temperatura del estado muerto. Esto hace que, a mayor temperatura ambiente, mayor sea la exergía del agua fría producida, de modo que ésta se aleja más del estado muerto. Esto aumenta el producto del sistema en términos exergéticos más de lo que aumenta el recurso, y por lo tanto aumenta la eficiencia de segunda ley.

4. CONCLUSIONES

Por medio de este estudio se pudo validar que el análisis termoeconómico es una herramienta útil en el estudio de distritos de enfriamiento en países con climas tropicales, en los cuales hay variaciones significativas de las condiciones ambientales.

Se considera que los modelos termodinámicos planteados para los diferentes sistemas que componen el DTLA son confiables, dado que se basaron en datos reales de operación, y en información de catálogo de los equipos instalados.

Se logró determinar los de costos del DTLA. Los resultados obtenidos son confiables, debido a que se utilizó información económica y administrativa de primera mano.

Los modelos y análisis de este trabajo son una herramienta que se puede utilizar para implementar acciones que ayuden a mejorar la eficiencia y la rentabilidad del DTLA. Además, pueden servir para evaluar conceptos de diseño de nuevos distritos térmicos en el país y en la región andina y caribe.

La información detallada sobre los costos exergéticos unitarios del recurso y del producto de cada uno de los equipos es útil para tomar decisiones sobre el diseño de nuevos sistemas, o la modificación de sistemas de enfriamiento existentes.

Los resultados obtenidos muestran que, para las condiciones locales del proyecto, los sistemas de refrigeración se ven significativamente afectados por la temperatura y la humedad relativa ambiente. Estas condiciones hacen que el desempeño del equipo disminuya en la medida que aumenta la temperatura, dado que se requiere más cantidad de recursos energéticos para generar la misma carga de refrigeración.

Según los análisis realizados en este estudio, las torres de enfriamiento son bastantes sensibles a las variaciones de las condiciones ambiente. De acuerdo con lo que se pudo observar a menor temperatura y mayor humedad relativa ambiente, el ventilador expulsa menor cantidad de humedad de aire al ambiente y en la medida que la temperatura aumenta, la humedad relativa del ambiente disminuye y la humedad del aire expulsado incrementa.

REFERENCIAS

- [1] Empresas Públicas de Medellín E.S.P -EPM- "Nuestros Proyectos. Que es un distrito Térmico" *epm.com.co*, agost. 25, 2016. [Online]. Available: www.epm.com.co/site/Nuestrosproyectos/ProyectoDistritoTérmico/QuéésDistritoTérmicoLaAlpujarra.aspx. [Accessed agost. 25, 2016].
- [2] Asociación de Empresas de Redes de Calor y Frío -ADHAC- "Guía básica de redes de calor y frío" *adhac.es*, abril, 2011. [Online]. Available: www.idae.es/Documentos. [Accessed agost. 25, 2016].
- [3] International Energy Agency -IEA- "District Heating and Cooling. The Technology" *iea.org*, 2013. [Online]. Available: www.iea-dhc.org/the-technology.html. [Accessed agost. 25, 2016].
- [4] Ö. Kizilkan, A. Şencan, and S. A. Kalogirou, "Thermoeconomic optimization of a LiBr absorption refrigeration system," *Chemical Engineering and Processing*, no. 46, Nov., pp. 1376–1384, 2007.
- [5] H. Cho, A. D. Smith, and P. Mago, "Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization," *Applied Energy*, no. 136, Sept., pp. 168-185, 2014.
- [6] H. Ghaebi, M. Amidpour, S. Karimkashi, and O. Rezayan, "Energy, exergy and thermoeconomic analysis of a combined cooling, heating and power (CCHP) system with gas turbine prime mover," *International Journal of Energy Research*, no. 35, Jun., pp. 697-709, 2011.
- [7] J. Deng, R. Wang, J. Wu, G. Han, D. Wu, and S. Li, "Exergy cost analysis of a micro-trigeneration system based on the structural theory of thermoeconomics," *Energy*, vol. 33, no. 9, Nov., pp. 1417–1426, 2008.
- [8] A. Mousafarash, "Exergy and Exergoenvironmental Analysis of a CCHP System Based on a Parallel Flow Double-Effect Absorption Chiller," *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2016, Apr., pp. 1-8, 2016.
- [9] A. Arsalis and A. Alexandrou, "Thermoeconomic modeling and exergy analysis of a decentralized liquefied natural gas-fueled combined-cooling-heating-and-power plant," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, no. 21, Aug., pp. 209-220, 2014.
- [10] C. Nguyen, C. T. Veje, M. Willatzen, and P. Andersen, "Exergy costing for energy saving in combined heating and cooling applications," *Energy Conversion and Management*, no. 86, Jun., pp. 349-355, 2014.
- [11] M. D. D'accadia, and F. de Rossi, "Thermoeconomic analysis and diagnosis of a refrigeration plant," *Energy Conversion and Management*, vol. 39, no. 12, Jul., pp. 1223–1232, 1998.
- [12] A. Dobrovicescu, G. Tsatsaronis, D. Stanciu, and V. Apostol, "Consideration upon Exergy Destruction and Exergoeconomic Analysis of a Refrigerating System," *Revista de Chimie*, vol. 62, no. 12, pp. 1168–1174, 2011.
- [13] G. Temir and D. Bilge, "Thermoeconomic analysis of a trigeneration system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 17–18, Apr., pp. 2689–2699, 2004.
- [14] M. A. Lozano and A. Valero, "Theory of the exergetic cost," *Energy*, vol. 18, no. 9, Jan., pp. 939–960, 1993.
- [15] Transportadora de Gas Internacional -TGI-, "Industria del Gas Natural," *tgi.com.co*, Agus. 25, 2017. [Online]. Available: www.tgi.com.co.
- [16] J. T. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1995.
- [17] C. Torres C. and A. Valero C., *Thermoeconomic Analysis*. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2012.
- [18] C. Torres C., "Exergoeconomía simbólica. Metodología para el análisis termoeconómico de los sistemas energéticos," PhD. Tesis, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1991.
- [19] A. Valero, M. A. Lozano, L. Sierra, G. Tsatsaronis, J. Pisa, C. Frangopoulos, and M. Von Spakovsky, "CGAM Problem: Definition and conventional solution," *Energy*, vol. 19, no. 3, May. pp. 279–286, 1994.
- [20] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, *Thermal Design and Optimization*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [21] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 2007.
- [22] Chapter 32. Energy estimating and modeling methods, *ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI)*, ASHRAE, 2005.

Marco legal para la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público en Colombia: Una perspectiva de sostenibilidad

Tatiana C. Fragozo G.¹
Sneyder Pastrán S.²
Leonel Castañeda³
Universidad EAFIT – Colombia

Los indicadores energéticos señalan al sector transporte como el mayor responsable del consumo de energía a nivel global, al proveerse en su mayoría por combustibles fósiles como el diésel o la gasolina. Dicha situación implica que este sector especialmente en Colombia sea el mayor contribuyente de gases de efecto invernadero, y que por consiguiente se convierta en un punto focal en la búsqueda de nuevas tecnologías y fuentes de suministro de combustibles para su funcionamiento, que permitan mejorar la calidad del transporte y contribuir al desarrollo de normatividad para el transporte público sostenible. Superar los desafíos de movilidad, y además hacerlo en el marco de la sostenibilidad, es uno de los retos que conlleva el crecimiento de las sociedades, por lo que se hace necesario la consecución de normas y políticas consecuentes con el desarrollo de la sociedad, en donde se prefiera los sistemas de transporte inclusivos, que operen con tecnologías limpias, se conecten con otros modos de transporte y sean atractivos para el usuario. Debido a lo anterior, fue necesario describir el impacto ambiental de vehículos de transporte público, para entrar a indagar en las alternativas de vehículos menos contaminantes. De igual manera, se indagó en las sugerencias que los autores recomiendan para la implementación de políticas que beneficien el uso de este tipo de vehículos, con la finalidad de sugerir la creación de un marco legal que regule lo concerniente a la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público, toda vez, que esta resulta ser una buena alternativa a diferencia de la adquisición o compra de toda una flota de vehículos eléctricos por los altos costos que esto representa.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la demanda de transporte continúa aumentando simultáneamente con el crecimiento de las urbes del mundo, y en consecuencia ha hecho que se eleve de sobremano la contaminación ambiental consiguiendo afectar la salud pública de la población. Esto implica, que los gobernantes se vean en la necesidad de mitigar los efectos negativos de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) ocasionados por el sector del transporte. El consumo y uso desmesurado de hidrocarburos en vehículos cuyo funcionamiento es el Ciclo Otto (ciclo termodinámico que se aplica en los motores de combustión interna de encendido provocado por una chispa eléctrica), generando emisiones de óxido de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), entre otros, contribuyen a generar y potenciar el efecto invernadero, la lluvia ácida y la contaminación del aire en las ciudades.

En consonancia, Acosta [1] encuentra que la gasolina y el diésel al ser la fuente de energía para la propulsión de vehículos de combustión interna más utilizado en el mundo, influye negativa y directamente en problemáticas como el calentamiento global, la disminución de las reservas de petróleo, el continuo incremento en los precios del combustible, el aumento de enfermedades respiratorias, y el aumento de contaminación. Adicionalmente, sostiene que este tipo de vehículos al final resultan ser poco eficientes debido al tipo de combustible que usan y al mantenimiento constante que se requiere para su sostenibilidad a lo largo de su vida útil.

Respecto del territorio Europeo, en [2] se describe que el transporte representa casi una cuarta parte de las emisiones de GEI en Europa, por lo que, una de cada tres personas que viven en ciudades europeas hoy en día sufre una calidad del aire que es ilegal según los estándares de calidad del aire de la Unión Europea (UE), quedando expuestos a niveles elevados de contaminantes considerados dañinos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), donde el dióxido de nitrógeno (NO₂) y las partículas finas son los dos principales contaminantes del aire del transporte por carretera, asociándolos con efectos adversos sobre el sistema cardiovascular y respiratorio de los seres humanos. Debido a esto, la flota europea de automóviles de pasajeros tiene una participación bastante significativa en los problemas locales de contaminación del aire, según [3], y aunque el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) ha descubierto que los gases de escape diésel son carcinógenos, las carreteras europeas siguen dominadas por los automóviles diésel. Como lo demostró la Comisión Europea (CE) en 2017, el sector de transporte fue responsable del 33.1% del consumo final de energía, del 23.5% de las emisiones de CO₂ equivalente de GEI, y fue el único sector cuyas emisiones han ido en aumento (un 20,9% en 2014 y un 23,1% en 2015).

En Colombia, Echeverri, Valencia y Acosta [4] al evaluar el impacto ambiental sobre la calidad del aire en los proyectos de rediseño de rutas de transporte público colectivo en la ciudad de Medellín, y al escoger parte del centro de esta como zona de estudio, encontraron que la cantidad total de contaminantes emitida por los buses en la zona de estudio es de 384.2 kg/día, además, la emisión de contaminantes de efecto invernadero proveniente de los buses es de 51.9 t/día, lo que corresponde al 9.28% de la emisión total. Finalmente encontraron que el contaminante que más emiten los buses es el dióxido de carbono con 51.8 t/día (9.28%). Para mitigar lo mencionado, en el año 2018 después de un

¹ inv_tfragozo@eafit.edu.co

² inv_spastran@eafit.edu.co

³ lcasta@eafit.edu.co

proceso licitación y, en concordancia con el Plan de Desarrollo de la Alcaldía de Medellín, en el que se habla de incentivar la transición a la movilidad eléctrica como método para mejorar la calidad del aire, el 27 de diciembre de ese mismo año se adjudicó el contrato para la compra de 64 buses eléctricos de Metroplús, el cual además de los buses incluye también 16 estaciones de carga que serán instaladas como parte del proceso según lo planteado por [5].

Sin embargo, a pesar de que la compra de buses eléctricos para reemplazar la flota de vehículos de transporte público propulsados mediante combustión interna resulta en perfecta relación con la mitigación de la contaminación ambiental que este tipo de vehículos proporciona, no se está teniendo en cuenta que los esfuerzos por renovar y comprar la flota debe ser suministrados con el capital de los dueños de los buses, sin tener retribución alguna con el tema de la chatarrización de los vehículos más antiguos.

Si bien, los sistemas de transporte público son un elemento importante de la movilidad, y juegan un rol fundamental en la sostenibilidad, no son el único factor que influye y mucho menos que determina la movilidad sostenible. Por el contrario, la movilidad se compone de una serie de dinámicas que aunada constituye un conjunto, cuyas consideraciones y orientación inclinará la balanza hacia una movilidad sostenible o no, y que se da en una relación que influye constantemente en el desarrollo social, y viceversa. Por un lado, el conjunto de la movilidad está muy ligado a la gestión pública, que influye en la planeación territorial, la determinación de los sistemas de transporte y el establecimiento de normas y regulaciones e incentivos. Por otra parte, no es ajena a las características de la población que interactúa con ellas, sino que se adapta a esta y sus condiciones. Así pues, se pueden identificar algunas problemáticas producto de esta relación, que han fomentado la aparición de diversas estrategias para su mitigación, entre las cuales se pueden encontrar propuestas que van desde la sensibilización de los individuos, hasta la reorganización física de las ciudades y la transformación de los modos de transporte.

El presente capítulo tiene como objeto principal la formulación de un marco legal para la legalización de proyectos de conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público en Colombia. Para ello, en primer lugar, se establecen las alternativas de modelos de vehículos menos contaminantes y se determinan cuáles son en la actualidad los obstáculos que se presentan a la hora de implementarlos. A continuación, se desarrolla una investigación que reúne las apreciaciones de diversos autores desde sus perspectivas y enfoques, todas ellas enmarcadas en la sostenibilidad, y que, tras identificar una problemática, presentan diversas alternativas para implementar en las ciudades, con el fin de dar un rumbo hacia la movilidad sostenible.

A partir de allí, se hizo indispensable identificar las variables que ofrecen los autores sobre normas y políticas que se pueden crear a favor de la adopción de los vehículos menos contaminantes especialmente los vehículos eléctricos. Posteriormente, se reseñó las diferentes políticas aplicadas en países como China, Estados Unidos y Holanda que fomentan la electrificación en sus vehículos. Luego, se decanta en la normatividad colombiana que desarrolla la presente temática, dejando claro que no existe un marco legal que abarque todos los aspectos para una movilidad pública sostenible, por lo que sólo existen normas aisladas de la misma. Todo lo anterior, con el fin de proponer un referente normativo en Colombia para la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público, y su respectiva implementación de la propuesta en vehículos de servicio público de 40 pasajeros en el Valle de Aburrá, como alternativa para la renovación de la flota de buses la cual actualmente es una medida de carácter obligatorio.

2. MÉTODO

El presente documento se presenta a manera de Estado del Arte, en el que se desarrolla una investigación documental basada en la recopilación de información de diferentes autores, cuyas posturas se pueden complementar entre sí, buscando tener una visión más amplia del transporte y que permita entender la movilidad y su enfoque hacia la sostenibilidad. Se utilizó una revisión sistemática de artículos científicos y revistas indexadas (principalmente en Scopus, una base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas) como técnica exploratoria y analítica para la recolección de información relevante sobre la problemática actual del impacto ambiental de vehículos de combustión interna utilizados para el transporte público en el mundo y con un enfoque directo hacia los aspectos que componen la movilidad sostenible. Las palabras clave empleadas en la búsqueda son: *Sustainable mobility, sustainable transport system, electric mobility, electric transport system*.

3. RESULTADOS

3.1 Alternativa de vehículos amigables con el medio ambiente

Para darle solución a la problemática de la contaminación ambiental, y sus consecuentes afectaciones a la salud de los seres humanos por parte de los vehículos de combustión interna de servicio público en las urbes del mundo, se ha manifestado que para hacerle frente el modo más efectivo es la implementación y adopción de vehículos amigables con el medio ambiente, estos son los vehículos de combustible alternativo (AFV por sus siglas en inglés) los cuales básicamente por ejemplo pueden ser alimentados total o parcialmente por combustibles alternativos como los biocombustibles (etanol, biogás) como lo plantea Jansson [6], citado por Rezvani, Jansson y Bodin [7, p. 123], quienes

a su vez, afirman que la principal variable actualmente son los vehículos eléctricos (EV, por sus siglas en inglés), los cuales se dividen según el tipo de tecnología utilizada, como pueden ser los vehículos híbridos eléctricos enchufables (PHEV, por sus siglas en inglés), vehículos eléctricos de batería de rango extendido (E-REV, por sus siglas en inglés), vehículos eléctricos de batería (BEV, por sus siglas en inglés) y vehículos eléctricos híbridos (HEV por sus siglas en inglés).

La importancia de los vehículos eléctricos radica en que emiten 20 veces menos NOx y cuatro veces menos partículas en suspensión que los automóviles con motor de combustión interna, por lo que los autobuses eléctricos también tienen mayores beneficios de eficiencia energética que los homólogos de diésel convencional e híbrido. Sin embargo, solo los vehículos propulsados por combustibles libres de carbono o electricidad pueden lograr el objetivo de reducir las emisiones de GEI, es decir, las baterías y las pilas de combustible combinadas con motores eléctricos están en la vanguardia para sustituir el motor de combustión interna, de modo que las baterías solo presentan una solución si se utilizan solas o en sistemas híbridos alimentados por combustibles sin carbono, haciendo alusión a lo mencionado por Fernandes, Woudstra, van Wijk, Verhoef, & Aravind [8].

Finalmente, junto con la electricidad y los biocombustibles, el hidrógeno es considerado como una alternativa para reducir las emisiones de carbono del sector del transporte, debido a que las emisiones del tubo de escape para el hidrógeno son cero, debido a que no contiene carbono, al contrario, sus emisiones están definidas por la tecnología de producción y la cadena de valor ascendente. Blanco, Nijs, Ruf, y Faaij [9], definen que la ruta propuesta para una baja huella de CO2 es la utilización de electricidad para la producción de hidrógeno con electrólisis, ya que esto permitiría alejarse de los combustibles fósiles en el transporte, contribuyendo a la seguridad energética y menor volatilidad del mercado, conduciendo a precios más estables y menor efecto en los consumidores.

3.1.1 Obstáculos en la implementación de vehículos eléctricos

Como es bien sabido, los vehículos eléctricos ofrecen ventajas significativas sobre aquellos vehículos de combustión interna, entre las que se pueden destacar la mayor eficiencia y rendimiento del motor eléctrico, la reducción de las emisiones de contaminación durante la operación y la reducción de los niveles de ruido. Se prevé que el uso de tecnologías de transporte más ecológicas, a través de una combinación de combustión interna de baja emisión y tracción eléctrica / pila de combustible, reducirá las emisiones primarias de CO2, NOx y partículas en suspensión del uso del vehículo. Sin embargo, tales iniciativas pueden considerarse verdes solo en la medida en que la fuente de suministro de energía sea renovable. Los vehículos propulsados por pilas de combustible aún pueden estar asociados con emisiones de contaminantes en regiones periurbanas si el hidrógeno es generado por fuentes de combustibles fósiles como lo afirman Tiwary *et al.* [10].

Liao, Molin, Timmermans y van Wee [11] aseguran que, a pesar del esfuerzo de los fabricantes de automóviles y la fuerte promoción de muchos gobiernos, las ventas de EV siguen siendo bastante bajas y sus beneficios potenciales no se materializan completamente. Aparentemente, los beneficios ambientales para la sociedad que aportan los EV no son muy valorados por muchos consumidores y son insuficientes en sí mismos para alcanzar una alta participación de mercado. La falta de atractivo de los EV en comparación con los vehículos convencionales se puede atribuir principalmente a las siguientes deficiencias. Primero, el precio de compra de los EV es considerablemente más alto en la mayoría de los países debido a los altos costos de la batería. En segundo lugar, la incertidumbre que los rodea, ya que estos utilizan tecnologías relativamente novedosas, aunque la mayoría de estos tienen un rango de conducción más corto en relación con los vehículos convencionales. Adicionalmente, el número limitado de estaciones de carga y el tiempo de carga bastante largo, siendo el más rápido aquel que toma alrededor de 30 minutos, resultando engorroso e inconveniente para muchos.

En Marruecos, por ejemplo, Chachdi, Rahmouni y Aniba [12] al analizar el panorama de los EV, vislumbraron que a pesar de que este tipo de coches representan un mercado favorable para el sector del automóvil, su desarrollo dentro de este está limitado por serias restricciones. La primera restricción es puramente presupuestaria, ya que 5 de cada 10 personas creen que el costo de compra de un automóvil eléctrico es un obstáculo. En cuanto a la autonomía la encuentran limitada, por lo que es una fuente de desmotivación para aproximadamente una sexta parte de los encuestados dentro de su estudio. Otra de las limitaciones es la falta de disponibilidad de los terminales de carga, así como el tiempo de recarga de las baterías, lo que, según la instalación, puede llevar horas.

3.2 Movilidad sostenible

Al referirse a la sostenibilidad en la movilidad, se deben considerar diferentes aspectos que interactúan entre sí, yendo más allá del medio de locomoción. Estos aspectos abordan desde la identificación de las necesidades de transporte de los individuos que forman parte de una sociedad, hasta el diseño territorial y la infraestructura de las ciudades, teniendo en cuenta las consideraciones normativas, ambientales y sociales, como el impacto en la salud a que haya lugar, pasando por el medio de transporte empleado para dicha movilización. Teniendo en cuenta estas consideraciones, la investigación “*Desarrollo Urbano Sostenible y de Transporte para el Transporte en Desventaja: Una*

Revisión” por Tan Yigitcanlar, Kushairi Rashid y Fatih Dur [13] categoriza los grupos más vulnerables afectados por el desarrollo urbano y el transporte no-sostenible como grupos de transporte en desventaja. En estos, se ubica a aquellas personas cuyo rango de alternativas de transporte, generalmente es limitado, especialmente por la disponibilidad de facilidades (diferentes medios y opciones económicas para viajar).

Recalcan además que el impacto negativo del transporte en los grupos en desventaja no ha sido considerado efectivamente en los modelos de urbanismo y transporte, y que esos modelos no toman todos los parámetros demográficos, espaciales y de servicios de transporte en cuenta, presentando entonces estos tres aspectos como dimensiones importantes para abordar en el estudio de las políticas de sostenibilidad en el marco del transporte.

Del mismo modo, en el documento *“Evaluación del Impacto de la Reurbanización Urbana en el Tráfico no Motorizado”* por Yanli Wang, Liang Li, Xiaoyu Zhu, Bing Wu y Linbo Li, [14] se identifica al transporte no motorizado (como caminar, la bicicleta y sus parientes como los Scooter), como el principal medio de movilización utilizado en ciudades antiguas. El estudio señala que es un modo de transporte saludable y sostenible, y juega un rol importante en el transporte urbano en la mayoría de los países desarrollados. No obstante, se debe considerar que, de acuerdo a la evaluación, las facilidades y ambientes que el tráfico no motorizado requiere son a menudo ignoradas en la planeación del transporte, y su impacto en el tráfico no está bien evaluado, por lo que es necesario evaluar su impacto real.

Por su parte, Becky Loo y Ka Ho Tsoi (2018) introducen en el artículo *“El Camino del Transporte Sostenible: Una Estrategia Holística de Cinco Transformaciones”* [15] una mirada hacia cinco aspectos relativos al transporte como eje de cambio, cuya transformación orienta su dinámica hacia la sostenibilidad. El conjunto de estas estrategias implica en primer lugar la transformación de las ciudades, específicamente centrándose en una mejor planificación espacial junto con un tránsito orientado hacia el desarrollo que promueva las caminatas como medio de transporte, promovido por cortas distancias de desplazamiento.

Como segunda medida, los autores señalan un cambio económico, centrado en reducir las externalidades negativas del comercio y la logística de carga en el sector del transporte. A este respecto se sugiere el desarrollo de nuevas industrias con tecnologías eco-amigables y técnicas de ahorro de energía. La tercera transformación propuesta es la transformación de los vehículos, haciendo uso de las nuevas tecnologías en comunicación y autonomía. Además, se incluyen las tecnologías de bajas o cero emisiones, reconociendo que en la planeación a futuro la electrificación vehicular debe incluir no solo los vehículos privados, sino las flotas de buses de los servicios de transporte público.

Otra de las estrategias abordadas es la transformación de la división modal, estimulando el uso del transporte público y suprimiendo el crecimiento de los automóviles, por un modo de transporte en el que el uso del transporte público se complementa con las caminatas promoviendo de esta forma los modos de transporte sostenibles. Finalmente, se formula la estrategia de la transformación del estilo de vida, entendiendo este como el aspecto más desafiante en la promoción del transporte sostenible. La educación en los principios de sostenibilidad, estilos de vida saludable, transporte activo y capital social es una herramienta importante para lograr este cambio.

Por su parte, abordando otro aspecto importante de la dinámica del transporte, Lóránt Tavasszy y Maja Piecyk (2018) en *“Transporte de Carga Sostenible”* [16] estiman que las operaciones del transporte de carga sostenible representan un desafío significativo con múltiples aspectos técnicos, operacionales y políticos: El diseño, prueba e implementación de intervenciones requiere una investigación multidisciplinaria y multinacional. En sí mismo, el documento recopila las investigaciones y aportes de diversos autores en los que se sugieren una serie de actividades aplicables al transporte de carga, y que pueden verse reflejadas en beneficios económicos y reducción en el impacto ambiental negativo.

Por un lado, se analizan siete documentos en los que, como indican los autores, además de ofrecer una visión referente a la medición de la sostenibilidad, también se direcciona el progreso en las diferentes y típicas etapas de preparación de un programa, Esta son, la definición de objetivos y el problema, aprender de experiencias pasadas, generación de soluciones sistemáticas, comprender el comportamiento del sistema, la construcción de escenarios y la evaluación de políticas. El segundo grupo de documentos se enfoca en la evaluación de soluciones específicas para reducir el contenido de carbono en el transporte, concernientes a un amplio rango de mediciones, una mejorada capacidad de utilización, electrificación, medidas regulatorias, combustibles alternativos y la aerodinámica de los vehículos.

3.2.1 Uso de la tecnología como estrategia de sostenibilidad

Jacek Malasek (2016) en el artículo *“Una Serie de Herramientas para hacer el Transporte más Sostenible”* [17] propone el transporte autónomo como una solución importante a considerar, enumerando entre los beneficios de dicha tecnología, mejoras en la seguridad, reducción de congestiones en el tráfico y menos estrés para los ocupantes de los vehículos. Malasek plantea que, a gran escala, los vehículos autónomos podrían hacer el transporte no solo más limpio y seguro, sino que además puede combatir los embotellamientos, ya que el flujo de tráfico puede ser controlado centralmente, como sucede con el control del tráfico aéreo.

Robin Lovelace et al. (2016) en el documento *“La Herramienta de la Propensión al Ciclismo: Un sistema de código abierto en línea para la planificación del transporte sostenible”* [18] examinan el alcance de esta herramienta que permite explorar el potencial del ciclismo en diferentes escalas geográficas y ayuda a proveer una base de evidencia para la planificación del ciclismo. Finalmente concluyen que la “Herramienta de Propensión al Ciclismo” sirve para ilustrar el potencial de las herramientas en línea para informar las decisiones de transporte y plantea el problema más amplio de cómo deben ser usados los modelos en la planificación del transporte.

Por su parte, en el documento *“¿Puede la nueva tecnología en comunicación promover el transporte sostenible?”* [19] Stephen Jia Wang y Patrick Moriarty (2017), analizan la tecnología de la comunicación desde dos perspectivas para entender cómo puede esta promover la sostenibilidad. Una primera aproximación hace referencia a las posibilidades de comunicarse de manera virtual, gracias a la Internet. Haciendo uso de esta conectividad a través de teléfonos inteligentes o computadoras se puede reemplazar el encuentro personal, lo que descarta el desplazamiento en un vehículo por parte de una o más partes. En su segunda acepción, se aborda el término de “Transporte Inteligente”, en el que se detallan algunas estrategias implementadas en las ciudades, sin embargo, en un sentido más amplio se adopta el uso de Big Data, promoviendo el uso de tarjetas inteligentes que permitan recopilar grandes cantidades de información, relativa al comportamiento de los usuarios del transporte público.

Anna Keller, Andrea Aguilar y Daniel Hanss (2018) en su investigación *“Interés de quienes comparten su automóvil en las Plataformas Integradas de Movilidad Multimodal: Una difusión de Perspectivas de Innovación”* [20] presentan un estudio basado en la teoría de difusión de innovaciones (Dol) en que buscan determinar el conocimiento, la aceptación y disposición por parte de los conductores que comparten su vehículo, a emplear estas plataformas tecnológicas, ya que, según sostienen, las Plataformas Integradas de Movilidad Multimodal son una herramienta promisorias para facilitar la transición hacia el transporte sostenible en áreas urbanas y rurales. No obstante, reconocen que estas herramientas siguen siendo ampliamente desconocidas, e identifican una de sus desventajas en que la difusión de innovaciones de software toma un largo tiempo; sin embargo, sugieren como estrategia para su difusión el apoyo institucional, por ejemplo, incluir el conocimiento de este tipo de software en los cursos de conducción.

3.2.2 Consideraciones de las alternativas frente a los vehículos convencionales

El artículo *“Emisiones de automóviles alimentados con combustibles alternativos basados en tecnología de motores: Una Revisión.”* [21] por Yisong Chen, Jinqiu Ma, Bin Han, Peng Zhang, Haining Hua, Hao Chen y Xin Su (2018) presenta una comparación entre el impacto que tienen combustibles alternativos como el gas natural, el metanol, el etanol y el biodiésel, entre otros y la gasolina o el diésel. En conclusión, se presenta al gas natural como la alternativa a la gasolina más importante y exitosa, toda vez que el biodiésel es una alternativa ideal y renovable ante el diésel, ya que sus propiedades están cercanas a las del diésel y su mayor ventaja es que se pueden mezclar en cualquier volumen.

“Vehículos eléctricos híbridos: algunas consideraciones teóricas sobre el comportamiento del consumo” [22] por Fabio Carlucci, Andrea Cirà y Giuseppe Lanza (2018) es un documento que estudia la acogida por parte de los consumidores de vehículos híbridos, notando que este mercado aún se encuentra en desarrollo y ha tenido una lenta aceptación, aunque con un crecimiento constante. Una apreciación importante es la posición de los autores, quienes creen que un sistema de transporte basado en tecnologías híbridas, podría ser en el mediano plazo, incluso más sostenible que un sistema de transporte basado solamente en vehículos del todo eléctricos, porque una rápida implementación de esta tecnología en la sociedad supondría una demanda de energía eléctrica adicional mayor a la que la industria puede proveer, y además, si la industria energética continúa empleando combustibles fósiles para generar electricidad, esto puede resultar en consecuencias aún más adversas para el medioambiente.

3.2.3 Buses eléctricos como alternativa sostenible

“Ejemplos de Desarrollo Sostenible en el área del Transporte” [23] por Marta Kadłubek (2015) es un documento en el que se contempla el desarrollo sostenible como uno de los elementos principales para la creación del área del transporte hoy en día. Como ejemplo de un producto de transporte sostenible en la gestión contemporánea de la ciudad, se presenta el bus City Smile CS10E, producido por AMZ, destacando beneficios propios de su operación, como la reducción de ruido y vibraciones, una disminución en la altura del vehículo de 320mm que aumenta el confort en el embarque y desembarque. Además, en materia de costos, es más barato que la operación de su par tradicional, ya que el costo por kilómetro del bus eléctrico es de 0,60 PLN, mientras que el bus diésel es de 2 PLN.

Lisiana Nurhadi, Sven Borén y Henrik Ny (2014) en el estudio *“Un análisis de sensibilidad del costo total para los propietarios de buses eléctricos en los sistemas de transporte público en ciudades suecas de tamaño medio”* [24] realizan un análisis de los costos totales que dos tipos de buses eléctricos generan a sus propietarios. Según sus resultados, en la comparación entre un bus eléctrico con una batería extra y un cargador normal (bus A) y un bus eléctrico con dos baterías extra y dos cargadores rápidos (bus B), el primero presenta el costo más bajo para su propietario. 15% menos comparado con otros buses eléctricos y 25% menos comparado con buses híbridos. De este modo, muestran la conveniencia de conducir estos buses (bus A) en las ciudades, ya que podría haber otro bus cargado como respaldo,

si un bus eléctrico tipo A ha sido conducido por 200 o 300 km en un día. Los buses híbridos son la opción más costosa, debido al alto precio de los combustibles fósiles, mientras que los buses B son la opción intermedia, aunque sus costos se ven elevados por el precio de los cargadores. En un período de 8 años, el bus B necesitaría 2 baterías, mientras que el bus A necesitaría solo una.

Michael Glotz-Richter y Hendrik Koch en el artículo “*Electrificación del transporte público en las ciudades (Proyecto ELIPTIC Horizonte 2020)*” [25] analizan el proyecto ELIPTIC (Electrification of public transport in cities) que forma parte del programa Horizon 2020 de la Comisión Europea. Dentro del análisis se detallan los pilares del proyecto, a saber: a) Integración segura de buses eléctricos empleando la infraestructura existente. b) Almacenamiento de la energía actualizando y/o regenerando los sistemas de transporte público eléctrico, y c) Uso multipropósito de la infraestructura de transporte público eléctrico.

Según los autores, la electrificación del transporte es la principal estrategia en muchos países alrededor del mundo para reducir la dependencia de combustibles fósiles. De manera primordial, se destaca que el material particulado PM10 y PM2.5 y aún más, las emisiones de NO2 son mucho más representativas en motores diésel que de gasolina. En ese sentido, para lograr la misma reducción de emisiones de un bus de 18m sería necesaria la electrificación de 100 automóviles, pero la congestión urbana y los problemas de estacionamiento no pueden ser solucionados con vehículos eléctricos. Finalmente sostienen que algunos incentivos para incrementar el uso de vehículos eléctricos como estacionamiento gratis o acceso a los carriles de buses envían un mensaje erróneo en el contexto general del transporte.

Larisa Gabsalikhova, Gulnaz Sadygova y Zlata Almetova (2018) en su artículo “*Actividades para convertir la flota de transporte público a buses eléctricos*” [26] señalan una serie de consideraciones a tener en cuenta al momento de integrar una flota de buses eléctricos a los sistemas de transporte público urbano. Entre ellas se detallan algunas ventajas obvias de los buses eléctricos frente a otros buses equipados con motores de combustión interna, como que el bus eléctrico prácticamente no produce ruido, es fácil de usar, confiable y duradero. Además, los buses eléctricos presentan otras ventajas frente a otros vehículos eléctricos como trolebuses o tranvías, ya que estos requieren una inversión en infraestructura mayor, y más aún, es casi imposible cambiar la red de rutas en caso de que los flujos de pasajeros cambien. No obstante, lo que se considera una ventaja también puede ser un problema.

Aunque los vehículos en movimiento representan la principal fuente de ruido en las áreas urbanas de la mayoría de los países industrializados y desarrollados, lo que afecta negativamente la salud y en general el estado emocional de la población de la ciudad, el ruido de los vehículos en movimiento es un factor de información clave para los usuarios de los caminos, como una señal de alerta de la aproximación de un vehículo por lo que se pueden presentar accidentes causados por el descuido de los peatones al invadir los carriles por descuido o exceso de confianza. Como medida de precaución se sugiere implementar un sistema de notificación que emita un sonido fácil de reconocer para el peatón y le permita percibir la aproximación del bus.

Finalmente, los autores sugieren que para realizar una transición hacia el transporte sostenible, debe seguirse una serie de pasos: a) Optimización de la flota de transporte en favor de vehículos medioambientalmente más amigables, b) Desarrollo de infraestructura para tipos de transporte alternativos, c) mejorar las especificaciones de calidad del combustible, d) Estimulación de la renovación de la flota de transporte usando un programa de desguace de vehículos, e) mejora de las tecnologías de transporte inteligente y e) estimulación estatal para el desarrollo de transporte amigable con el medio ambiente.

Valentina Conti, Silvia Orchi, Maria Pia Valentini, Marialisa Nigro y Raffaella Calò (2017) en el documento “*Diseño y Evaluación de Soluciones Eléctricas para el Transporte Público*” [27] presentan los resultados de su estudio realizado a cinco rutas de buses diferentes en la ciudad de Roma, mediante el *Sistema de Apoyo a las Decisiones (Decision Support System [DDS])* el cual fue desarrollado por la Agencia Nacional Italiana para el Desarrollo Económico de Nuevas Tecnologías, Energía y Sostenibilidad.

En el estudio se plantean tres casos de operación con buses eléctricos. La arquitectura A corresponde a la implementación de un bus eléctrico con sistema de carga lento en el garaje durante la noche, en el que los vehículos están provistos de baterías de gran capacidad de almacenamiento de energía. La arquitectura B plantea una oportunidad de carga de algunos minutos en las estaciones más la carga durante la noche, en la que los buses cuentan con baterías más pequeñas y una arquitectura C con una carga rápida en las paradas, oportunidad de carga en las estaciones y una carga lenta durante la noche. Este caso emplea baterías de baja capacidad de almacenamiento de energía. Los buses de combustión interna diésel y a gas natural comprimido (GNC) también se consideraron.

Los resultados presentados, muestran que las alternativas eléctricas son siempre de menor costo interno frente al diésel o al GNC. Las principales ventajas de la electrificación residen principalmente en el costo de la energía y mantenimiento; además, la arquitectura B representa la mejor opción frente a las desventajas de alta inversión en infraestructura de carga y almacenamiento energético. Finalmente, se concluye que los costos operacionales de un

vehículo eléctrico son menores que su contraparte convencional, y que la electrificación debería verse en el mediano y largo plazo como la de mayor efectividad frente a los costos, que las tecnologías convencionales.

En el documento *“Buses de Ciudad Totalmente Eléctricos – La opción viable”* [28] Mikko Pihlatie, Samu Kukkonen, Teemu Halmeaho, Veikko Karvonen y Nils-Olof Nylund (2014) presentan un estudio para determinar la viabilidad de la implementación de este tipo de vehículos en los sistemas de transporte mediante un análisis de costo total para el propietario. Dentro de los principales costos relacionados a la operación de los sistemas de transporte, detallan los costos laborales de los conductores, los costos de capital, y los costos de combustible y mantenimiento.

Además, plantean una serie de requisitos que deben cumplirse para que la vinculación de este tipo de vehículos sea exitosa en los sistemas de transporte. Sugieren entonces que el tamaño de la flota no debe incrementarse cuando se reemplazan vehículos convencionales por eléctricos; la operabilidad de los buses eléctricos debe estar al mismo nivel que la de los buses convencionales y el nivel de servicio, rentabilidad y confort de los pasajeros debe ser igual o mejor comparado con los buses convencionales. Este documento concluye que los buses de bajo rango son la opción más económica gracias al tamaño más pequeño de sus baterías y a la carga de oportunidad, pudiendo estos tener menos costos que sus pares convencionales diésel, si se tiene en cuenta la tecnología del vehículo, la infraestructura de carga y el nivel del sistema.

3.3 Sugerencias y recomendaciones para la implementación de políticas que beneficien el uso de vehículos eléctricos

En vista de lo anterior, se sugiere [29] [30] que los gobiernos promuevan el uso de EV, proporcionándoles prioridad vial, además de la ampliación de las infraestructuras de carga, y en contraposición se aumente el impuesto sobre el combustible. En resumidas cuentas, indican que se deben aplicar los subsidios directos, las deducciones fiscales, y las exenciones de tarifas (por ejemplo, en estacionamientos, peajes y ferries) para este tipo de vehículos. Adicionalmente se deben incluir políticas orientadas a reducir los precios de compra; por supuesto todo dentro del marco de regulaciones como la Corporate Average Fuel Economy (CAFE) en los Estados Unidos o las normas de emisiones de CO₂ de la UE. Sin embargo, Pegels, Vidican-Auktor, Lütkenhorst y Altenburg [31] aseguran que esperar que los gobiernos por sí solos avancen hacia la transformación verde de sus políticas de gobierno es poco realista. Por lo tanto, sugieren que los gobiernos deben coordinar sus acciones con actores no estatales como el sector industrial y la sociedad civil, ya que estos grupos están en la capacidad de apoyar u oponerse al cambio.

En resumidas cuentas, Lieven [32] señala que los gobiernos podrían implementar regulaciones represivas como el programa de Vehículos de Emisión Cero (ZEV's program) de California, que requiere que los fabricantes de automóviles produzcan un cierto porcentaje de vehículos que no emitan gases a la atmósfera. Además, podrían imponerse sanciones a los combustibles derivados del petróleo, afirmando que esto podría desanimar a los consumidores a comprar automóviles con motores de combustión interna. Por lo que la mejor estrategia es implementar medidas compuestas que comprendan una parte represiva y una parte de incentivo, que se reflejarían en altas tarifas para automóviles con alta contaminación y descuentos para automóviles con baja contaminación.

3.4 Políticas que incentivan la adopción de vehículos eléctricos a nivel global

3.4.1 China

El sector del transporte en China se ha convertido en uno de los principales consumidores de energía, representando en 2006 el 7,5% del consumo total, y a nivel ambiental contribuyó significativamente con las emisiones de GEI en dicho país. En 2009, el gobierno comenzó a cobrar un impuesto a los combustibles sobre el consumo de gasolina, siendo este el primer impuesto a la energía que se recaudó en China. También se han introducido permisos de entrada obligatorios para vehículos de energía limpia, con el fin de mejorar el entorno de inversión, regular el mercado de vehículos y alentar a los fabricantes a invertir en investigación y desarrollo como lo dispone Gu, Teng & Wang [33].

Respecto al transporte público los autores mencionados encontraron que, en 2005, el Consejo de Estado de la República Popular de China emitió un decreto para dar prioridad a este sector [33, p.121], el cual ordenó a los gobiernos locales la mejora de la infraestructura del transporte público, por lo que al menos 10 ciudades chinas están planificando o expandiendo activamente los sistemas de transporte pública hacia los sistemas de autobús de tránsito rápido, que en comparación con otros modos de transporte público, este es una de las soluciones más atractivas para los países en desarrollo, ya que tiene un bajo requerimiento de inversión y un menor uso de energía, además de bajas emisiones de carbono.

Finalmente, en China [34] las políticas relevantes en la materia se pueden resumir de la siguiente manera: el gobierno otorga subsidios directos para la compra de vehículos eléctricos, ha eximido del impuesto de compra sobre los vehículos eléctricos, y en ciudades como Beijing se permite la compra ilimitada de vehículos con batería eléctrica, así como en Shanghai donde los autos ecológicos pueden obtener matrícula gratuita.

3.4.2 Estados Unidos

Sierzchula et al. [35] citados por Bjerkan, Nørbech y Nordtømme [36], existen factores de gran relevancia que influyen en la adopción de vehículos eléctricos, por ejemplo los aspectos tecnológicos, las características del consumidor, además de factores como los precios del combustible, los costos de electricidad y la disponibilidad de estaciones de carga. En Estados Unidos, por ende, con el fin de ir eliminando las barreras que se puedan presentar para la adopción de vehículos eléctricos, se han desarrollado políticas para promover su uso, entre las que se destacan: el subsidio a la compra, financiamiento del equipo de suministro de vehículos eléctricos, electricidad gratuita, estacionamiento gratuito o exenciones de pruebas de emisiones.

3.4.3 Noruega

Los generosos incentivos han posicionado a Noruega como el principal mercado de BEV en el mundo, dado que los consumidores han comprado el 80% y más del 85% de los BEV vendidos y registrados en Noruega según OFVAS citado por Figenbaum [37], claro está, dicha condición se presenta ya que tres cuartas partes de los hogares estacionan sus vehículos en sus propios terrenos porque la mayoría de las casas tienen una capacidad de energía suficiente instalada para cargar EV.

Debido a esto, en Noruega los BEV y los automóviles de hidrógeno están exentos del impuesto de *matriculación de vehículo*. En segundo lugar, los BEV están exentos del impuesto sobre el valor agregado, que en Noruega actualmente es del 25% y, en tercer lugar, los BEV y los automóviles de hidrógeno pagan la tarifa más baja de la *licencia de vehículo*. Adicionalmente a estos incentivos financieros, los BEV en Noruega se benefician de la exención del peaje en las carreteras y del pago de tarifas de boletos en los ferries en la mayoría de los condados, e incluso gozan de estacionamiento gratuito en el estacionamiento público municipal destinados para ellos [38].

Los precios de los combustibles en Noruega se encuentran entre los más altos de Europa, mientras que la electricidad es barata, con un 96% producido en centrales hidroeléctricas. El sector del transporte noruego está fuertemente gravado, se destacan impuestos en la matriculación de vehículos nuevos, impuestos anuales, impuestos a los combustibles y numerosas carreteras con peaje. Este régimen permite crear incentivos mediante la renuncia selectiva de impuestos, lo que influye en los tipos de vehículos vendidos. Todo lo anterior es posible, ya que Noruega tiene un sistema de crédito fiscal y un sistema de subsidios de ayuda directa con un alto estatus económico y una infraestructura de carga relativamente buena.

3.5 Normatividad colombiana relacionada con la adopción de vehículos eléctricos

Dentro del ámbito jurídico colombiano se han creado diferentes normas jurídicas y medidas aisladas, pero hasta la fecha existe un régimen jurídico que regule de manera global los temas relevantes de las actividades vinculadas con el EV. En primera instancia, la constitución política colombiana [L1] consagra que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano, por lo que ineludiblemente ha llevado a que el Estado adopte medidas y estrategias tendientes a reducir la contaminación atmosférica generada por la emisión GEI, como se ve reflejado en la Tabla 1.

Tabla 1. Disposiciones legales relacionadas con los EV en Colombia

Objeto de estudio	Normatividad
Ámbito medioambiental	*Ley 23 de 1973 [L2]: Indica que el medio ambiente es patrimonio, por lo que su conservación requiere de la participación del Estado y los particulares. Además, otorga la posibilidad de crear incentivos y estímulos económicos para fomentar programas e iniciativas encaminadas a la protección del medio ambiente.
	*Ley 99 de 1993 [L3]: Establece que el proceso de desarrollo económico y social del país se orientará según los principios universales y del desarrollo sostenible contenidos en la Declaración de Río de Janeiro de junio de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo.
	*Ley 164 de 1994 [L4]: Estipula que para controlar las emisiones de GEI, se debe tomar en cuenta la aplicación de nuevas tecnologías. *Ley 1844 de 2017 [L5]: Incorpora al ordenamiento jurídico colombiano el Acuerdo de París, y el Estado se compromete a reducir en un 20% las emisiones de GEI antes del 2030.
Ámbito tributario y arancelario	*Ley 1819 de 2016 [L6]: Los inversores de carga eléctrica para uso en EV, HEV, PHEV, concebidos para el transporte de 10 o más personas, incluidos los vehículos de tipo familiar y los de carreras, además aquellos para el transporte de mercancías se consideran bienes gravados con una tarifa del IVA diferenciada del 5%.
	*Decreto 1116 de 2017 [L7]: Establece que para la importación de vehículos totalmente eléctricos será del 0% y los vehículos híbridos del 5%, hasta el 2027.
Ámbito energético	*Ley 697 de 2001 [L8]: Fomenta el uso racional y eficiente de la energía; además, promueve la utilización de energías alternativas. *Decreto 3683 de 2003 [L9]: Se crea la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía.
Ámbito transporte	*Decreto 87 de 2011 [L10]: Faculta al Ministerio de Transporte para desarrollar las políticas de uso de combustibles limpios, adoptar los incentivos a la importación o a la producción de vehículos de tecnología limpia, así como a los equipos y elementos asociados a esta tecnología.

De otro lado, en desarrollo de la ley de uso racional de energía [L8], se habilitó una línea de proyectos asociados a transporte público con tecnologías de bajas emisiones o emisiones cero, mediante la cual se obtiene una exención en el impuesto sobre el valor agregado y se otorga un periodo de gracia de 2 años en el impuesto de renta; sin embargo, dicho proceso implica tiempos demasiado extensos comparados con los tiempos que fija la ley para la importación y la matrícula de los vehículos, convirtiéndose en una barrera para la aplicación del incentivo.

3.5.1 Normatividad sobre movilidad sostenible en área metropolitana del Valle de Aburrá

A pesar de que Medellín es considerada la ciudad del país con el mejor sistema de transporte público, sostenible con el medioambiente, según un informe del 2015 de la OMS [39], esta ciudad ocupa el noveno puesto como la más contaminada en Latinoamérica, después de Cochabamba (Bolivia), Lima (Perú), Río de Janeiro (Brasil), Monterrey y Toluca, (México), Guatemala, Tegucigalpa (Honduras) y Belo Horizonte (Brasil). Dicha situación, ha llevado a que las autoridades tomen las medidas necesarias para combatir el incremento considerable de la contaminación del aire, por la descarga de gases que produce el uso de los automotores.

En primera instancia, se adopta el plan de movilidad segura de Medellín 2014 – 2020 “movilidad para la vida” [L11], donde la Alcaldía de Medellín pretende construir progresivamente un sistema de movilidad que ofrezca seguridad a todos los usuarios, motivando el compromiso ciudadano, adoptando reglas de conducta con autoridad y dentro de un espacio público apropiado para la circulación eficiente y sostenible, que proteja la vida e integridad física de la población. Posteriormente, el concejo de Medellín crea una estrategia para la promoción y masificación de la movilidad eléctrica en el municipio de Medellín [L12] [L13], con el objeto de estimular el uso de vehículos impulsados por energía eléctrica como medio de transporte para los ciudadanos, desarrollando las gestiones necesarias para determinar la viabilidad de implementar incentivos de tipo económico o exenciones en el pago de tributos. Adicionalmente, se ha establecido la obligatoriedad para modernizar la flota de buses de públicos de pasajeros [L14], donde las empresas de transporte deberán garantizar dicha modernización con flotas de vehículos que operen con tecnologías limpias, teniendo en cuenta los porcentajes de la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de renovación de flota

Implementación	Porcentaje de Flota Nueva	
Año 1	10%	Del total de la flota que no opera con tecnologías limpias
Año 2	25%	
Año 3	45%	
Año 4	60%	
Año 5	70%	

Por supuesto, todo lo anterior dentro del marco del Plan de Desarrollo 2016-2019 “Medellín Cuenta Con Vos” [L15], el cual en su dimensión estratégica 5 denominada “Movilidad Sostenible”, tiene como objetivo principal proporcionar a los ciudadanos una movilidad accesible, segura y comfortable, que aporte al mejoramiento de la calidad de vida de una manera coherente con los principios de sostenibilidad, fortaleciendo la reestructuración del transporte público colectivo de Medellín.

4. DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito se propone en primera medida que las actuaciones de las autoridades administrativas vinculadas a los trámites legales y administrativos para la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna sean llevadas a cabo bajo las premisas de celeridad, economía y simplicidad, por lo que con fin de simplificar trámites, reducir costos e incentivar la conversión eléctrica de vehículos a gasolina, para que una vez efectuada la conversión no se requiera el cambio de la licencia de tránsito, como ocurre en la actualidad con los vehículos convertidos a gas natural vehicular en Colombia.

Ahora bien, se sugiere que se habilite un sistema de información específicamente para los casos de conversión eléctrica de vehículos de combustión interna, es decir, que dentro del RUNT se disponga un módulo de información donde se validen, registren y autoricen las transacciones para la conversión eléctrica de dichos vehículos. Dicho módulo de información deberá tener como finalidad principal la identificación de los vehículos de combustión interna convertidos a eléctricos, controlando desde la conversión hasta el suministro de energía en las estaciones que se dispongan para tal fin.

Adicionalmente, controlar a través de la autoridad competente que los vehículos en mención cumplan con todos los requisitos legales; permitirles a los distribuidores y/o comercializadores de energía consultar si las estaciones de servicio a las que les hacen el suministro cumplen con todos los requisitos legales; e igualmente, controlar que los talleres y/o empresas dedicadas a la conversión eléctrica cumplan con todos los requisitos legales para su funcionamiento. A continuación, se realizará una breve descripción de la propuesta política y administrativa para la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público, donde se entrará a explicar detalladamente cada punto en cuestión.

En el transporte de pasajeros se ha adoptado la política de desarrollo de Sistemas Integrados de Transporte Masivo para las ciudades con mayor número de habitantes en Colombia, como han sido los casos de Bogotá y Medellín en donde los gobiernos locales han avanzado en la búsqueda y desarrollo de diferentes medios de transporte y sobre todo de mejores condiciones de movilidad de sus ciudadanos. Actualmente estos sistemas de transporte están funcionando con tecnologías que utilizan diésel principalmente y aun cuando son equipos que presentan mejor desempeño ambiental y energético que modelos de transporte anteriores, no dejan de presentar emisiones e impactos importantes en las ciudades donde operan.

En ese sentido se considera es necesario enfocar un programa de promoción para la conversión eléctrica vehículos de combustión interna en Colombia, que ayude a la solución del problema de movilidad, evitando de igual forma efectos negativos en cuanto a emisiones de gases y partículas, y que brinde mayor eficiencia energética es el de transporte público masivo de pasajeros. Esto es, que, a través de los gobiernos distritales y municipales por medio programas de conversión eléctrica para este tipo de vehículos, se incentive la adopción de estos. En el caso de la demanda para la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público, los estímulos tributarios pueden ser una herramienta estimulante en la medida que se logre compensar lo máximo posible el valor de dichas conversiones. Por lo que se propone lo siguiente:

- Rentas exentas para la comercialización de autopartes que sean producidas en el país, y para la operación de mantenimiento y servicio técnico a los vehículos convertidos en el país.
- Introducir exenciones o descuentos en el impuesto municipal al rodamiento de vehículos con emisiones cero.
- Deducción por inversiones en investigación y desarrollo para los grupos de investigación cuyos proyectos estén dirigidos sobre la línea de conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público que cumplan con los requisitos de calificación o aprobación de carácter científico, tecnológico o de innovación tecnológica ante el Ministerio de Educación Nacional.

En lo que respecta a la venta de energía para abastecer a los futuros buses convertidos a eléctricos, se deben establecer las reglas generales para realizar transacciones de energía con destino a la recarga de EV, además de los derechos, obligaciones, deberes, condiciones de acceso y celebración de contratos de conexión para quienes suministren la energía.

Como se deduce de la revisión de la literatura realizada con precedencia, uno de los retos más grandes que tienen los EV para su penetración es el alto costo de inversión inicial que se debe hacer frente a la de un vehículo convencional de similares condiciones. Teniendo en cuenta que los costos de operación de los EV son muy inferiores a los que se registran en los vehículos convencionales, es posible buscar modelos de financiación para la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público, que permitan a los usuarios ir amortizando parte del diferencial de la inversión con los ahorros de los costos de operación. Adicionalmente, se recomienda establecer una política arancelaria que permita el desarrollo de un mercado de EV, referente a la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público con una sostenibilidad en el tiempo que garantice de 0% a los costes de importación de motores y generadores eléctricos.

Las temáticas mencionadas en el aparte inmediatamente anterior perfectamente pueden ser desarrollados para su implementación mediante política pública. Aunque el proceso de construcción de las políticas no debe verse como un orden estricto y sucesivo de etapas que están condicionadas unas a otras, si es necesario establecer un punto de partida, un durante y un después de la política, en donde se pueda definir qué se prioriza en esta o cuál es su objeto de acción, los roles que cumplen los actores involucrados en su formulación y desarrollo, sus alcances y los mecanismos de implementación entre otros.

En ese sentido se propone como metodología para la construcción de la política pública el siguiente ciclo compuesto por cinco fases, que son la de elaboración de la agenda pública, formulación de la política, adopción de la decisión, implementación y evaluación de la política implementada. Con base esto, la administración municipal por intermedio de las áreas encargadas, deberán desarrollar estrategias de gestión y educación, de posicionamiento, divulgación y de apropiación, que permitan que la ciudadanía en general conozca, utilice y fomente la tecnología de movilidad eléctrica en el Municipio.

La primera estrategia deberá estar encaminada a fomentar la educación con el fin de dar a conocer los beneficios que trae la utilización de la movilidad eléctrica, además de destacar la información relacionada con la utilización de la tecnología de movilidad eléctrica, sus beneficios medioambientales, en la salud pública y el desarrollo de esta, dentro del Municipio. Posteriormente, se deberá orientar en destacar los beneficios que conlleva la utilización de la movilidad eléctrica. Para ello, las autoridades competentes deberán incluir en los planes de reposición del parque vehicular del Municipio de Medellín, la conversión de al menos un cincuenta por ciento (50%) de vehículos eléctricos del total de los vehículos que se planeen reponer, por lo que se deberá incentivar dentro de su conglomerado, la conversión eléctrica de vehículos de combustión interna de servicio público.

En lo que respecta a los incentivos económicos la Administración Municipal, por intermedio de la Secretaría de Hacienda, deberá estudiar la viabilidad de implementar beneficios en materia de tributos municipales, a los propietarios de vehículos combustión interna de servicio público convertidos a eléctricos matriculados en el Municipio de Medellín, además deberá establecer convenios con entes públicos o privados con el fin de dar a conocer esta tecnología y ejecutará proyectos de movilidad eléctrica que beneficien el medio ambiente de la ciudad.

En el tema de infraestructura la Administración Municipal, por intermedio de la Subsecretaría de Gestión de Bienes de la Secretaría de Suministros y Servicios y de los mecanismos jurídicos que estime conveniente, deberá facilitar a las Empresas Públicas de Medellín, predios donde se adecuarán sitios de recarga, distribuidos a lo largo del casco municipal, de manera que los propietarios de este tipo de vehículos puedan tener acceso a recargar sus vehículos en estos lugares. Igualmente, el Departamento Administrativo de Planeación Municipal, de acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial, deberá establecer el tipo de mobiliario que se utilizará en la adecuación de los sitios de carga pública.

5. CONCLUSIONES

Es un error considerar que los problemas de movilidad obedecen únicamente a los medios de transporte disponibles en una sociedad. Por el contrario, otros factores como la distribución territorial o las preferencias de los individuos también están presentes en esta problemática. No obstante, transformar los sistemas de transporte público es una de las principales herramientas de política pública para contrarrestar los efectos adversos de la constante necesidad de movilidad que tiene el ser humano.

La literatura presentada demuestra que la electrificación de los medios de transporte es posible, a pesar de su alto costo de inversión, ya que los precios del diésel son muy elevados en comparación con el costo de la electricidad. Por otra parte, la implementación de vehículos eléctricos debe ser una premisa gubernamental, ya que contribuyen directamente a la reducción de los gases de efecto invernadero a la atmósfera, y por ende contribuyen a la sociedad.

Pese a esto, la electrificación del parque automotor no soluciona el problema de la congestión vehicular, por lo que lo ideal es estimular el uso del transporte público sobre el vehículo privado, o incentivar el uso compartido de este, con el fin de disminuir su número en las vías. En este sentido, la tecnología adquiere especial relevancia, ya que además de ser una herramienta de difusión y sensibilización, también puede proveer el espacio en que los usuarios se pueden comunicar entre sí, poniendo en contacto a las personas que decidan acogerse a esta opción.

La movilidad sostenible debe abordarse con una visión global, en la que se consideren todos los aspectos que influyen en ella para gestionar las estrategias de mitigación de la problemática que esta supone. De este modo, pueden desarrollarse planes que realmente combatan el impacto negativo que esta tiene desde todos los frentes, ya que idear planes sesgados que consideren solo una porción del problema no genera soluciones reales.

A pesar de que Medellín es considerada la ciudad colombiana con el mejor sistema de transporte público debido a que es amigable con el medioambiente, el aire de la ciudad tiene un nivel de contaminación intermedio, lo que significa que, aunque no supera el límite establecido por la OMS, los habitantes aspiran una cantidad considerable de partículas nocivas que penetran profundamente en sus pulmones y en el sistema cardiovascular.

Debido a esto, las autoridades del Área Metropolitana del Valle de Aburrá han tomado medidas para disminuir los altos índices de contaminación en la región, entre los que se destaca la adjudicación por parte de Metroplús de un contrato para la adquisición de 64 buses 100% eléctricos al consorcio Green Medellín, lo que convertirá a la ciudad en la capital de movilidad eléctrica de Latinoamérica al contar con una de las flotas más grandes de este tipo.

Sin embargo, los gobernantes de la región han dejado de lado la problemática que se avecina si se dejan de lado todos aquellos buses de servicio público de combustión interna que actualmente circulan por toda el área metropolitana, donde todo el parque automotor quedará obsoleto y que posiblemente represente pérdidas económicas para sus propietarios.

Es en ese punto, donde proponer todo un marco legal para la conversión eléctrica de este tipo de vehículos resulta bastante oportuna, ya que, al fomentar este tipo de proyectos se presenta una gran oportunidad para crear incentivos arancelarios, tributarios, de promoción e innovación o adaptación tecnológica de vehículos de combustión interna, y de promoción para los sectores encargados de proveer la infraestructura necesaria para el desarrollo de vehículos eléctricos.

REFERENCIAS

- [1] D. Acosta, "Factibilidad de la conversión de un vehículo de combustión a eléctrico: Autotrónica", trabajo de fin de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/806>. [Accedido en: 12-feb-2019].

- [2] I. Carrilero *et al*, "Redesigning European Public Transport: Impact of New Battery Technologies in the Design of Electric Bus Fleets", *Transportation Research Procedia*, vol. 33, pp. 195-202, 2018.
- [3] N. Hoofman, M. Messagie, J. Van Mierlo, and T. Coosemans, "A review of the European Passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 86, pp. 1-21, 2018.
- [4] C. Echeverri, G. Valencia, y A. Acosta, "Metodología para evaluar el impacto ambiental sobre la calidad del aire en los proyectos de rediseño de rutas de transporte público colectivo en las ciudades. estudio de caso: Medellín", *Revista ingenierías*, vol. 11, no. 20, pp. 31-42, 2012.
- [5] A. Orrego, "Medellín ya adquirió flota de 64 buses eléctricos" *El colombiano*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://m.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/medellin-ya-adquirio-flota-de-buses-electricos-DJ9975498>. [Accedido en: 12-feb-2019].
- [6] J. Jansson, "Consumer eco-innovation adoption: assessing attitudinal factor and perceived product characteristics", *Business Strategy and the Environment*, vol. 20, pp. 192-210, 2011.
- [7] Z. Rezvani, J. Jansson, and J. Bodin, "Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 34, pp. 122-136, 2015.
- [8] A. Fernandes, T. Woudstra, A. van Wijk, L. Verhoef, and P. Aravind, "Fuel cell electric vehicle as a power plant and SOFC as a natural gas reformer: An exergy analysis of different system designs", *Applied Energy*, vol. 173, pp. 13-28, 2016.
- [9] H. Blanco, W. Nijs, J. Ruf, and A. Faaij, "Potential for hydrogen and Power-to-Liquid in a low-carbon EU energy system using cost optimization", *Applied Energy*, vol. 232, pp. 617-639, 2018.
- [10] A. Tiwary, *et al*. "Systems scale assessment of the sustainability implications of emerging green initiatives". *Environmental Pollution*, vol. 183, pp. 213-223, 2013.
- [11] F. Liao, E. Molin, H. Timmermans, and B. van Wee, "Consumer preferences for business models in electric vehicle adoption", *Transport Policy*, vol. 73, pp. 12-24, 2019.
- [12] A. Chachdi, B. Rahmouni, and G. Aniba, "Socio-economic Analysis of Electric Vehicles in Morocco". *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 644-653, 2017.
- [13] T. Yigitcanlar, K. Rashid y F. Dur, "Sustainable Urban and Transport Development Disadvantaged: A Review", *The Open Transportation Journal*, vol. 4, pp. 1-8, 2010.
- [14] Y. Wang, L. Li, X. Zhu, B. Wu y L. Li, "Evaluation of urban redevelopment impact on non-motorized traffic", *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 2, núm. 3, pp. 187-197, 2015.
- [15] B. Loo y K. Tsoi, "The sustainable transport pathway: A holistic strategy of Five Transformations", *The Journal of Transport and Land Use*, vol. 11, núm. 1, pp. 961-980, 2018.
- [16] L. Tavasszy y M. Piecyk, "Sustainable Freight Transport", *Sustainability*, vol. 10, 2018.
- [17] J. Malasek, "A set of tools for making urban transport more sustainable", *Transport. Resea. Proc.*, vol. 14, pp. 876-885, 2016.
- [18] R. Lovelace, A. Goodman, R. Aldred, N. Berkoff, A. Abbas y J. Woodcock, "The Propensity to Cycle Tool: An open source online system for sustainable transport planning", *The Journal of Transport and Land Use*, vol. 10, no. 1, pp. 505-528, 2017.
- [19] S. Wang y P. Moriarty, "Can new communication technology promote sustainable transport?", *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2132-2136, 2017.
- [20] A. Keller, A. Aguilar y D. Hanss, "Car Sharers' Interest in Integrated Multimodal Mobility Platforms: A Diffusion of Innovations Perspective", *Sustainability*, vol. 10, 2018.
- [21] Y. Chen, J. Ma, B. Han, P. Zhang, H. Hua, H. Chen y X. Su, "Emissions of automobiles fueled with alternative fuels based on engine technology: A review", *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 5, núm. 4, pp. 318-334, 2018.
- [22] F. Carlucci, A. Cirà y G. Lanza, "Hybrid Electric Vehicles: Some Theoretical Considerations on Consumption Behaviour", *Sustainability*, vol. 10, 2018.
- [23] M. Kadlubek, "Examples of Sustainable Development in the Area of Transport", *Procedia Economics and Finance*, vol. 27, pp. 494-500, 2015.
- [24] L. Nurhadi, S. Borén y H. Ny, "A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities", *Transportation Research Procedia*, vol. 3, pp. 818-827, 2014.
- [25] M. Glotz-Richter y H. Koch, "Electrification of public transport in cities (Horizon 2020 ELIPTIC Project)", *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 2614-2619, 2016.
- [26] L. Gabsalikhova, G. Sadygova y Z. Almetova, "Activities to convert the public transport fleet to electric buses", *Transportation Research Procedia*, vol. 36, pp. 669-675, 2018.
- [27] V. Conti, S. Orchi y M. Valentini, "Design and evaluation of electric solutions for public transport", *Transportation Research Procedia*, vol. 27, pp. 117-124, 2017.
- [28] M. Pihlatie, S. Kukkonen, T. Halmeaho, V. Karvonen y N. Nylund, "Fully electric city buses – The viable option", *presented at the IEEE International Electric Vehicle Conference IEVC 2014*, 2014.
- [29] N. Wang, L. Tang, and H. Pan, "A global comparison and assessment of incentive policy on electric vehicle promotion", *Sustainable Cities and Society*, vol. 44, pp. 597-603, 2019.
- [30] T. Gnann *et al*, "What drives the market for plug-in electric vehicles? - A review of international PEV market diffusion models", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 158-164, 2018.
- [31] A. Pegels, G. Vidican-Auktor, W. Lütkenhorst, and T. Altenburg, "Politics of Green Energy Policy", *The Journal of Environment & Development*, vol. 27, pp. 26-45, 2018.
- [32] T. Lieven, "Policy measures to promote electric mobility – A global perspective". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 82, pp. 78-93, 2015.
- [33] A. Gu, F. Teng, and Y. Wang, "Sector Mitigation Policies and Methods in China: Measurable, Reportable, and Verifiable Mechanisms". *Advances in Climate Change Research*, vol. 2, pp. 115-123, 2011.
- [34] B. Lin, and W. Wu, "Why people want to buy electric vehicle: An empirical study in first-tier cities of China", *Energy Policy*, vol. 112, pp. 233-241, 2018.
- [35] W. Sierzchula *et al*, "The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption", *Energy Policy*, vol. 68, pp. 183-194, 2014.
- [36] K. Bjerkan, T. Nørbech, and M. Nordtømme, "Incentives for promoting Battery Electric Vehicle (BEV) adoption in Norway", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 43, pp. 169-180, 2016.

- [37] E. Figenbaum, "Perspectives on Norway's supercharged electric vehicle policy". *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 25, pp. 14-34, 2017.
- [38] T. Yong, and C. Park, "A qualitative comparative analysis on factors affecting the deployment of electric vehicles". *Energy Procedia*, vol. 128, pp. 497-503, 2017.
- [39] P. Morales, "Pese a tener metro y tranvía, Medellín sufre por la contaminación", *El Tiempo*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16555834>. [Accedido en: 14-feb-2019].

Anexo legislativo

- [L1] Constitución política de Colombia de 1991. Artículo 79.
- [L2] Ley 23 de 1973. Por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente y se dictan otras disposiciones.
- [L3] Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
- [L4] Ley 164 de 1994. Por medio de la cual se aprueba la "Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992.
- [L5] Ley 1844 de 2017. Por medio de la cual se aprueba el "Acuerdo de París", adoptado el 12 de diciembre de 2015, en París, Francia.
- [L6] Ley 1819 de 2016. Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones.
- [L7] Decreto 1116 de 2017. Por el cual se modifica parcialmente el Arancel de Aduanas y se establecen disposiciones para la importación de vehículos eléctricos, vehículos híbridos y sistemas de carga.
- [L8] Ley 697 de 2001. Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.
- [L9] Decreto 3683 de 2003. Por el cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 y se crea una Comisión Intersectorial.
- [L10] Decreto 87 de 2011. Por el cual se modifica la estructura del Ministerio de Transporte, y se determinan las funciones de sus dependencias.
- [L11] Decreto 1856 de 2014. Por medio del cual se adopta el Plan de Movilidad Segura de Medellín 2014-2020 "Movilidad para la vida".
- [L12] Acuerdo 44 de 2015. Por medio del cual se crea "La estrategia para la promoción y masificación de la movilidad eléctrica" en el municipio de Medellín.
- [L13] Decreto 1221 de 2016. Por el cual se reglamenta el Acuerdo Municipal número 44 de 2015 "Por medio del cual se crea la estrategia para la promoción y masificación de la movilidad eléctrica en el Municipio de Medellín".
- [L14] Resolución 2504 de 2016. Por medio del cual se modifican las políticas generales de movilidad para la reorganización del Transporte Público Colectivo del Municipio de Medellín.
- [L15] Plan de Desarrollo 2016-2019 "Medellín Cuenta Con Vos".

Efecto de un postratamiento térmico en un acero microaleado con diversos procesos termomecánicos

Itzel Reyes¹

Adair Jiménez N.²

Bernardo Campillo³

^{1,3} Universidad Nacional Autónoma de México

² Cinvestav, Unidad Querétaro

México

Estudio de los cambios microestructurales y las propiedades mecánicas por efecto de un pos-tratamiento térmico a 600°C en un acero microaleado al finalizar la línea del proceso de producción. Observando los cambios microestructurales en el acero, por un lado, debido a la recristalización secundaria, y, por otro lado, causada muy probablemente a la presencia de elementos aleantes en forma de soluto en la matriz del acero que pueden derivar en una co-precipitación, para lo cual se utilizaron técnicas de microscopía electrónica de Barrido (SEM) y microscopía electrónica de Transmisión (TEM). Las propiedades mecánicas se evaluaron mediante ensayos de tensión y microdureza Vickers, determinando así los puntos donde se obtiene el máximo y mínimo de resistencia a la cedencia, resistencia máxima y microdureza.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la fabricación del acero, el avance más significativo en los últimos 50 años es indudablemente el desarrollo de aceros con un uso juicioso y económico de elementos microaleantes tales como el Nb, Ti, y V (aceros microaleados) [1], [2], [3], [4]. La característica principal de estos aceros es la microaleación, que se refiere al incremento significativo en la resistencia del acero añadiendo muy bajos contenidos de Nb, V, Ti e inclusive Al [1], [2]. Un factor esencial para el desarrollo de estos aceros fue que las ferroaleaciones de Nb y V, estaban disponibles a un precio económicamente ventajoso para reemplazar aceros de alta aleación con aceros microaleados [2], [3]. otro factor fue que los contenidos de C podían reducirse haciendo al acero más soldable [5]. Aunado a estas ventajas se realizaron esfuerzos en el ámbito internacional para entender detalladamente la metalurgia física de estos aceros lo cual sentó las bases para el diseño de sus aleaciones.

La clave para el desarrollo de las propiedades mecánicas de estos aceros fue el descubrimiento de una relación cuantitativa entre el tamaño de grano y el incremento en la resistencia y tenacidad a la fractura [6]. Estas relaciones permitieron cuantificar y ver por separado los efectos de los elementos microaleantes. En investigaciones posteriores [7] se reveló que primordialmente la formación de finos carburos nitruros de los elementos microaleantes refinan el grano y endurecen al acero por precipitación quedando establecido el beneficio de estos elementos con relación a las propiedades mecánicas. Estos efectos se relacionan principalmente a la formación de precipitados ya sea carburos nitruros. La estabilidad y solubilidad de estos precipitados dentro de las temperaturas que puedan existir al procesar el acero son factores claves para la obtención de microestructuras y propiedades mecánicas deseadas. Un tamaño de grano fino provee la mayor parte de la resistencia y tenacidad requeridas. Al aplicar un tratamiento térmico de normalizado cada uno de los elementos microaleantes es capaz de refinar el grano.

Por ejemplo, se han reportado tamaños de grano de 5µm en placas de 25 mm de espesor tratadas con Al conteniendo adiciones de V y N [6], [7]. Los precipitados de VN, NbCN y TiC son efectivos para controlar el crecimiento de grano además de ser estables a 900 °C. Los únicos carburos nitruros efectivos para controlar el crecimiento de grano a altas temperaturas de austenización son los de Ti. Existe una tendencia en reducir costos de producción mediante la reducción o remoción de refinar el tamaño de grano a través del uso del tratamiento térmico después de la laminación o el forjado. En un esfuerzo para lograr esto se añaden pequeñas cantidades de Ti para minimizar el tamaño de grano cuando se calienta el acero antes de ser formado y para controlar el crecimiento de los granos recristalizados durante la deformación en las placas laminadas y aceros forjados en caliente [4], [7]. Actualmente el proceso más utilizado para obtener microestructuras con tamaño de grano fino es la laminación controlada [4], [5], [7]. Este efecto ha promovido su rápido uso particularmente en aceros para ductos.

Este avance incluye la introducción del enfriamiento acelerado después de la laminación para dar un refinamiento de grano adicional. En aceros con altos contenidos de C, la solubilidad del Nb es extremadamente limitada, se ha encontrado que el V puede ejercer un efecto significativo sobre la recristalización [2], [7] y por lo tanto para aceros con medio C, la adición de V puede refinar el grano durante la fabricación del acero. Una desventaja de reducir la velocidad de recristalización durante la deformación es que el acero se endurece lo cual impacta negativamente sobre las instalaciones y potencia de los molinos de laminación, por lo que se requiere más potencia y molinos de laminación más resistentes. Otro aspecto importante de los elementos microaleantes es que mejoran la resistencia de los aceros

¹ ItzelRCH@hotmail.com

² adairjn@cinvestav.mx

³ bci@icf.unam.mx

por precipitación. Esto se logra mediante la formación de finos carbonitruros durante o inmediatamente después de la transformación de austenita a ferrita. [2], [8]. En la mayoría de los aceros el V es más soluble que el Nb aun cuando el contenido de N es relativamente alto. Por lo tanto, el V tiene mayor potencial de endurecimiento por precipitación debido a la presencia de mayores fracciones de volumen de sus partículas.

El V es el elemento más versátil para el endurecimiento por precipitación, capaz de ser efectivo en aceros con diversas composiciones. El incremento del contenido de C vuelve al V más efectivo aún en aceros con microestructuras predominantemente perlíticas, ya que existe un incremento en la resistencia debido a la precipitación de VCN dentro de las laminillas de ferrita. El V también endurece por precipitación a aceros tratados térmicamente.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los aceros utilizados para el presente trabajo fueron aceros dos aceros microaleados de diferente procedencia y procesos termomecánicos. Dos de los aceros el acero A y el acero B, fueron obtenidos mediante un enfriamiento lento-controlado, después de su deformación en caliente, y el acero C fue obtenido mediante un enfriamiento acelerado al finalizar su ciclo termomecánico. Su composición química se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de la composición química en % en peso de los dos aceros A y B

Acer0	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Ti	V
A	0.0641	1.068	0.016	0.036	0.015	0.251	0.040	0.008	0.039
B	0.074	1.087	0.017	0.036	0.017	0.013	0.037	0.003	0.050

Se seccionaron muestras de estos aceros en forma de placa, y estas se obtuvieron en ambos sentidos de distintos tramos de la placa, realizándose cortes en sentido longitudinal (L) y en sentido transversal (T) con respecto a sentido de laminación de las placas. Se maquinaron probetas de tensión de cada acero en cada sentido (L y T), según la subnorma: ASTM, E 8M-04. [9], y seccionaron muestras para las observaciones microestructurales y para los ensayos de microdureza. Se limpiaron todas las muestras, para remover el exceso de grasa dejado por el maquinado con alcohol y acetona.

Se realizaron post-tratamientos térmicos a las muestras a 600°C, y se mantuvieron isotérmicamente durante diversos tiempos: 3, 6, 8, 10 y 20 horas. Las muestras se enfriaron en agua con agitación vigorosa. Para la observación microscópica las muestras se prepararon metalográficamente mediante una secuencia de desbaste grueso a fino, y luego pulidas con alúmina de distintos tamaños de partícula. Para revelar las microestructuras se utilizó Nital 3%. Para la observación microestructural óptica se utilizó un microscopio óptico olympus PMG-3, utilizando como analizador de imágenes un sistema Image-Pro plus, versión 4.5.0.19.

Se utilizó microscopia electrónica de barrido (SEM) para realizar análisis en las mismas muestras observadas en microscopia óptica, pero además para analizar las superficies-morfologías de las fracturas obtenidas. Esto se realizó tanto en muestras atacadas y no-atacadas, y en las distintas condiciones. Para monitorear los cambios microestructurales en el acero que no se observaron el microscopio óptico y así como los precipitados que pudiesen resolverse a estas magnificaciones. Para este propósito se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL Modelo JSM 5900 a 20 kV, acoplado con un detector para realizar microanálisis EDS.

Para realizar un análisis más detallado de los precipitados se utilizó microscopia electrónica de transmisión (TEM). Para esto se prepararon las muestras para su observación obteniéndose inicialmente laminillas de 25 a 50 µm de espesor, en esta condición se obtienen discos de aproximadamente 3 mm de diámetro, y posteriormente se electropulieron en un equipo marca Struers modelo Tenupol 3, con una solución de ácido perclórico con 10% de metanol, a -20°C. Se lavan profusamente con alcohol y acetona. En esta condición las muestras fueron analizadas en un MET Jeol-2010 a 200 KV, acoplado con un detector para microanálisis (EDS). También se aplicó la técnica de réplicas de C, en ciertas muestras.

Se determinaron las propiedades mecánicas en tensión utilizando una máquina de ensayos de tensión marca MTS modelo 661.23B, siguiendo la sub Norma ASTM E 8M-04. Se realizaron determinaciones de microdureza en las diversas muestras con un microdurómetro HMV-2ASSY, Shimadzu, con 0.5 Kgf de carga.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización microestructural

La Figura 1 muestra las micrografías de los aceros bajo estudio en su condición de llegada. Mostrando una estructura bandeada compuesta principalmente de ferrita y perlita, tal y como se muestra en la figura para los aceros A y B. En el acero A (1a), se observa una ferrita dúplex, con mayores regiones de perlita que en el acero B (1b); no se aprecia una ferrita acicular en ambas microestructuras. A estos aumentos no es posible apreciar a detalle la microestructura.

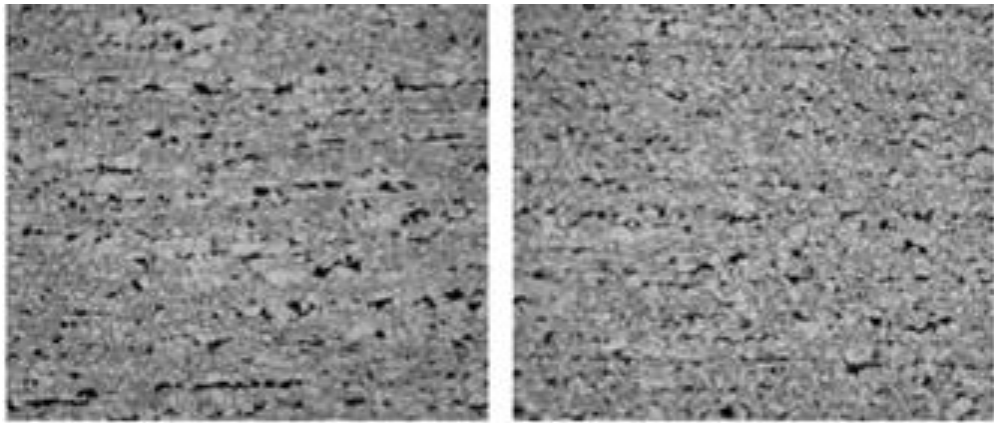


Figura 1. Aceros en su condición de llegada después del tratamiento termomecánico (Nital 3%, 100X)

3.1.1 Caracterización microestructural acero tipo A en la sección longitudinal

La secuencia micrográfica del acero tipo A se presenta figura 2. Se puede percibir un ligero cambio en los tamaños y distribución en los granos ferrita, así como, en la estructura de perlita a los diferentes tiempos de tratamiento térmico. En principio microestructura se mantiene similar entre la condición de llegada y 3 horas de tratamiento (Figura 2a y 2b), en la Figura 2c a 6 horas de tratamiento se comienza a observar que la ferrita no presenta un crecimiento debido a que los precipitados de Ni, Ti, Nb y las partículas ϵ -Cu [10], [11] anclan los límites de grano. Por otro lado, la perlita tiende a esferoidizarse a este tiempo de tratamiento dentro y a lo largo de los límites de grano, a las 8 horas de tratamiento se observan regiones de ferrita más heterogénea (Figura 1d) la perlita es similar a los tiempos de 6 horas, en la Figura 2e. A 10 horas de tratamiento, la microestructura en general no sufre cambios significativos con respecto a 8 horas, esto es, se observan regiones de ferrita compuesta de granos grandes y pequeños y si el promedio de tamaño de grano muestra un ligero crecimiento (Tabla 2).

Tabla 2. Tamaño de grano ASTM promedio en cada tiempo de tratamiento, para el acero tipo A(L)

Acero (Hrs)	No ASTM
A-L, 0H	10.9
A-L, 3H	10.9
A-L, 6H	10.8
A-L, 8H	11.3
A-L, 10H	11.6
A-L, 20H	11.5

En la Figura 1f se observa la microestructura obtenida a 20 horas de tratamiento se mantiene una ligera tendencia de crecimiento relativo de los granos de ferrita principalmente en las regiones de mayor deformación plástica localizada. El ligero incremento mostrado en el promedio de tamaño de grano es explicable en base a que, a esta temperatura de tratamiento, es suficiente para permitir que los procesos de recuperación y recristalización han actuado en conjunto aunados a un ligero crecimiento promedio de los granos de ferrita. Los valores obtenidos con del promedio de los tamaños de grano de ferrita se muestran en la Tabla 2 conforme el tiempo de tratamiento se incrementa.

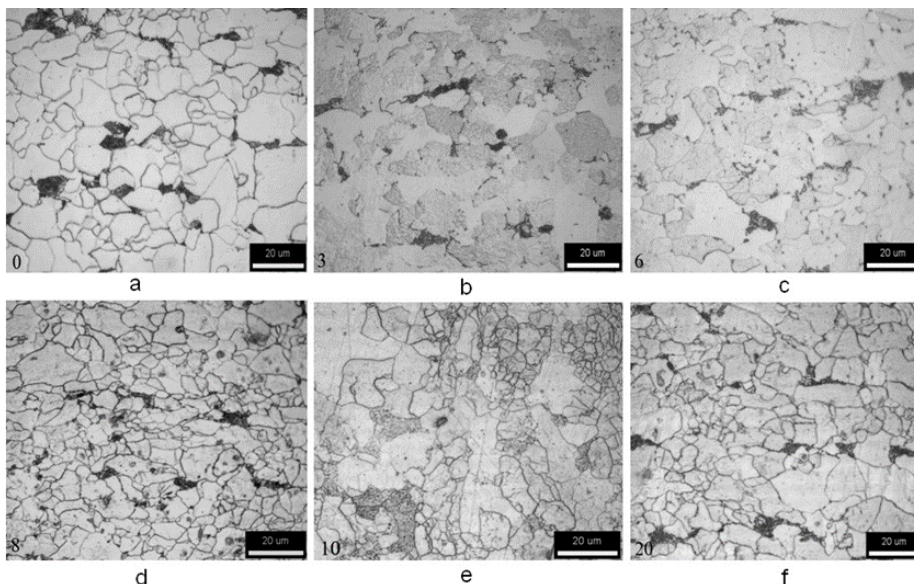


Figura 2. Micrografías de acero tipo A corte longitudinal (ataque Nital 3%, 1000X), a) 0, b) 3, c) 6, d) 8, e) 10, y f) 20 horas

3.1.2 Caracterización microestructural acero tipo A en la sección transversal

Secuencia micrográfica del acero tipo A en esta dirección se presenta Figura 3. En general se observa pocos cambios en relación a los tamaños de grano de ferrita promedio obtenidos (Tabla 3). Sin embargo, lo más evidente son los cambios que se observan tanto en la morfología de los granos de ferrita. La Figura 3a es en la condición de llegada, en donde se presenta una microestructura muy acicular tipo basáltica, y regiones que se pueden observar indicios de ferrita Widmanstatten, y tal vez trazas de perlita poco laminar con fuerte tendencia a pasar a ser bainita (superior). Sin embargo, estas microestructuras dependen principalmente de grado de sub enfriamiento durante los procesos termomecánicos y es muy difícil establecer diferencias mediante solo microscopia óptica.

Tabla 3. Tamaño de grano ASTM promedio en cada tiempo de tratamiento, para el acero tipo A(T)

Acero (Hrs)	No ASTM
A(T)-0H	11.5
A(T)-3H	11.8
A(T)-6H	11.6
A(T)-8H	11.7
A(T)-10H	11.4
A(T)-20H	11.9

Al pasar de las 3 horas de tratamiento se observa como la ferrita acicular y la ferrita tipo Widmanstatten muestra cambios (Figura 3b), principalmente la acicularidad se modifica y la ferrita Widmanstatten ya no es muy evidente, sin embargo mantiene parte de su morfología hasta las 6 horas como se observa en la Figura 3c; en la Figura 3d tenemos que ha desaparecido los basaltos de ferrita así como la ferrita Widmanstatten, esto es un claro indicio de disolución de estas fases a las 8 horas de tratamiento térmico. En las Figuras 3e y 3f se muestran las microestructuras obtenidas a 10 y a 20 horas de tratamiento lo que ya es evidente es que la ferrita es acicular y sin indicios de ferritas más basálticas y la ferrita Widmanstatten ya no se observan. Aquí es claro que existe una recuperación y una recristalización de granos a estos tiempos de tratamiento, sin embargo, los tamaños promedio de ferrita casi no varían conforme el tiempo este efecto se vio más claramente en el sentido de longitudinal de laminación del mismo acero (Figura 2). Aun cuando la microestructura presento cambios más perceptibles que el sentido longitudinal, el promedio en el tamaño de grano se mantiene casi constante como lo muestra la Tabla 3. Es importante resaltar la dificultad para medir los granos en el corte transversal.

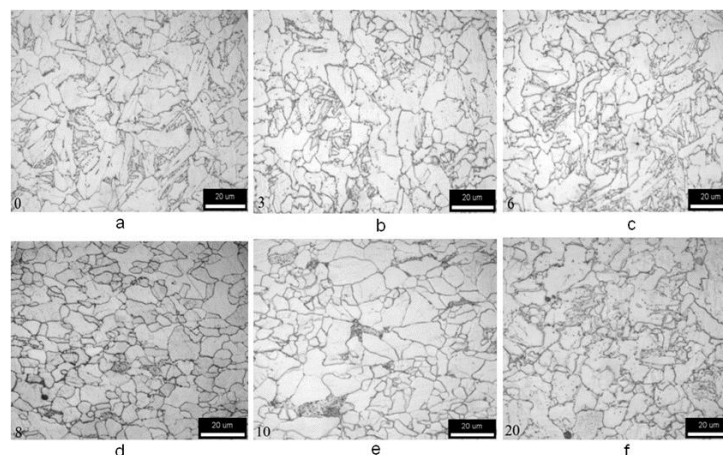


Figura 3. Micrografías de acero tipo A corte transversal, con Nital al 3%, 1000X, a) 0, b) 3, c) 6, d) 8, e) 10, y f) 20 horas

3.1.3 Caracterización microestructural acero tipo B en sección longitudinal

En la secuencia de fotomicrografías mostradas en la Figura 4, se observa cambios en la microestructura de este acero B en sentido longitudinal. Se logra identificar que hay ligeros cambios a medida que el tiempo de tratamiento térmico aumenta esto es se llegan a observar regímenes con ligeros cambios en los tamaños de grano pequeño esto tal vez se deba a una menor recristalización en las regiones donde aún se acumulaba deformación plástica.

En la Figura 4a se muestra de probeta de llegada en el sentido longitudinal donde se ve claramente las bandas formadas por el tipo de proceso termomecánico, los granos de ferrita son principalmente aciculares y una estructura de perlita y/o bainita relativamente fina. Las Figuras 4b y 4c no muestran cambios en relación a la muestra de llegada. Es evidente que no se observa cambios en los tamaños de grano en ferrita. A partir de los tiempos de tratamiento 8 horas en adelante (Figuras 4d, 4e y 4f) se observan cambios en la ferrita acicular hay cierta tendencia de la misma a ser equiaxial y se observan regiones donde hay una mayor cantidad de granos de ferrita totalmente recristalizada. También es claro que se observan granos de ferrita dúplex, lo que está sucediendo es el avance de los procesos de recuperación y de recristalización siendo tal vez las regiones aledañas a la fase de ferrita y/o bainita donde esto sucede a medida que el tiempo de tratamiento es mayor.

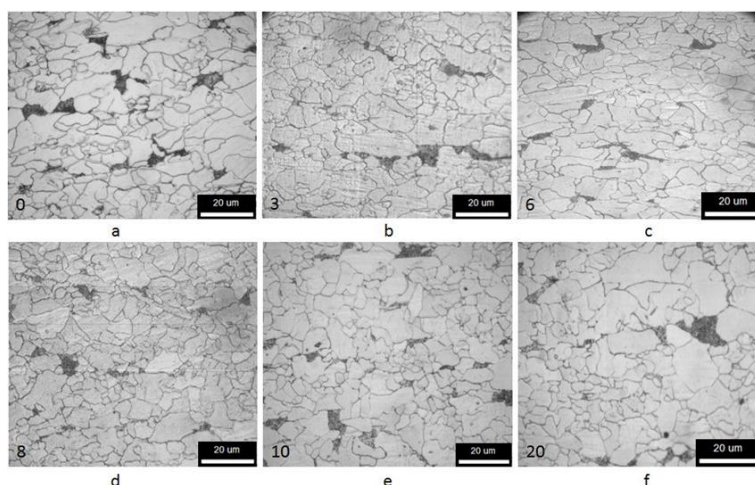


Figura 4. Micrografías de acero tipo B corte longitudinal, (ataque Nital 3%, 1000X), a) 0, b) 3, c) 6, d) 8, e) 10, y f) 20 horas

Esto parece ser un típico comportamiento de recrystalización secundaria, donde el crecimiento se da solo en algunos granos en la matriz, de manera preferencial en el sentido de trabajado mecánico. Este tipo de recrystalización es común en aceros con un gran número de vacancias [12] - [14], en este acero además del número de vacancias existentes como en cualquier acero los defectos en la red cristalográfica aumentan por la cantidad de microaleantes y hay que sumarle los defectos de la precipitación [15], [16].

En la Tabla 4 se presentan las mediciones de los tamaños de grano obtenidos en este acero. La variación del tamaño de grano de ferrita es mínima la cual quiere decir que los precipitados están actuando sobre los límites de grano de la ferrita ya que se anclan en los límites de grano retardando así la recrystalización de la matriz ferrítica, inhibiendo su posible crecimiento por efecto del pos-tratamiento realizado. El mecanismo de crecimiento en sentido preferencial se observa en ambos aceros tratados térmicamente en su corte longitudinal, pero es más evidente en el acero tipo B.

Tabla 4. Tamaño de grano ASTM promedio en cada tiempo de tratamiento, para el acero tipo B(L)

Acero (Hrs)	No ASTM
B-L, 0H	12
B-L, 3H	12.8
B-L, 6H	13
B-L, 8H	13.1
B-L, 10H	12.9
B-L, 20H	12.4

3.1.4 Caracterización microestructural acero tipo B en la sección transversal

La Figura 5 la serie de micrografías del acero tipo B donde observamos en todas ellas granos de ferrita acicular, en algunos una ferrita basáltica con ciertas regiones en donde se manifiesta una ferrita Widmanstatten, con trazas de perlita y/o bainita. En las primeras fotomicrografías (Figuras 5 a, b y c) la morfología en general no cambia en relación a lo antes comentado. Sin embargo, a partir de las 8 horas de tratamiento la morfología de ferrita tipo Widmanstatten basáltica no se observa lo cual nos indica que a partir de estos tiempos de tratamiento esta morfología se recupera y existen partículas muy finas en límites de grano, y junto se observa partículas parcialmente redondeadas que son muy probablemente carburos de hierro de la perlita y/o bainita presente.

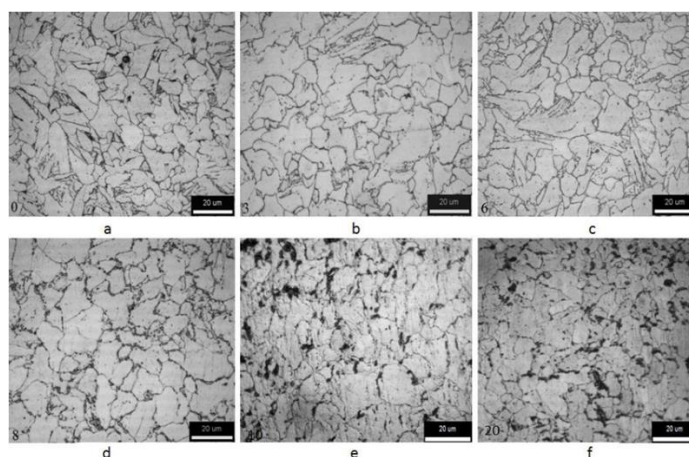


Figura 5. Micrografías de acero tipo B corte transversal, (ataque Nital 3%, 1000X), a) 0, b) 3, c) 6, d) 8, e) 10, y f) 20 horas

Esta tendencia se conserva en los siguientes tiempos de tratamiento sin embargo en los tiempos de 20 horas esta apariencia de finos carburos de hierro en los límites de grano ya no es muy evidente (Figuras 5e y 5f). El tamaño de grano promedio de ferrita se muestra en la Tabla 5 y, no obstante, la recuperación como los cambios de morfología en la ferrita tipo Widmanstatten y ferrita en forma de basaltos, no tienen influencia sobre el promedio de tamaño de grano que, en este corte, de manera similar al corte transversal del acero tipo A.

Tabla 5. Tamaño de grano ASTM promedio en cada tiempo de tratamiento, para el acero tipo B(T)

Acero (Hrs)	No ASTM
B(T)-0H	11.1
B(T)-3H	11.4
B(T)-6H	11.1
B(T)-8H	11.2
B(T)-10H	11.2
B(T)-20H	11.4

3.1.5 Caracterización mecánica acero tipo A

La Figura 6 muestra las curvas de los ensayos de tensión obtenidos para el acero tipo A en el sentido longitudinal esto es en la dirección de laminación de estos aceros, se observa en general un comportamiento similar en las curvas y es evidente que no se logra diferenciar con claridad los cambios en su comportamiento mecánico en relación al tiempo de tratamiento térmico. En la Figura 7 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación de solo los resultados obtenidos en la muestra de llegada y en aquellas donde como resultado presentaron mayor y menor resistencia.

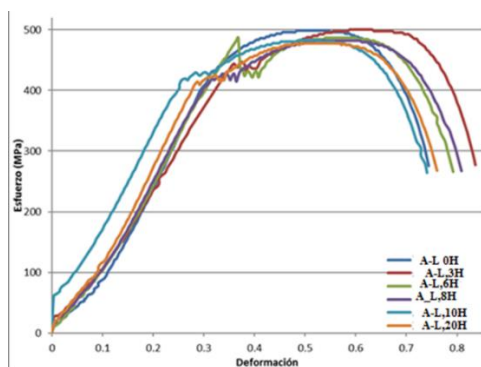


Figura 6. Curvas esfuerzo deformación de acero tipo A cortes longitudinales

En la Figura 7, aun cuando muestra un comportamiento cerrado es más claro observar el cambio en las propiedades mecánicas. La probeta con 3 horas de tratamiento térmico la A-L,3H, es la que mejores propiedades mecánicas mostro, se puede observar un incremento en la resistencia a la fluencia y un insignificante aumento en la resistencia máxima en comparación con la condición de llegada. La muestra tratada a 6 horas de tratamiento se observó un incremento de resistencia a la fluencia sin embargo la resistencia máxima disminuyo (Tabla 6), en la misma figura se presentan los resultados obtenidos de la muestra obtenida a 20 horas, aquí hay una disminución de la resistencia a la fluencia como una disminución en la resistencia máxima.

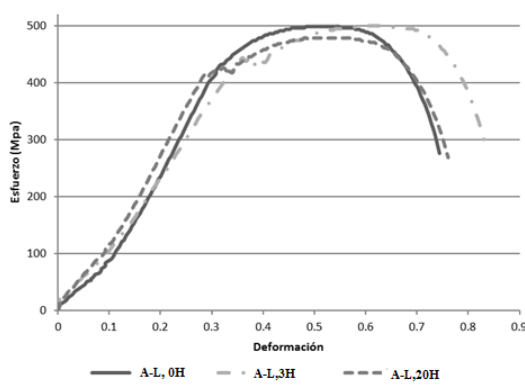


Figura 7. Curvas esfuerzo-deformación de acero tipo A(L), 0, 3 y 20 horas de tratamiento

Si tratamos de establecer una relación de las propiedades obtenidas en estas condiciones, con respecto al promedio de tamaño de grano medido en estas muestras (Tabla 2) del acero tipo A en este corte longitudinal observamos que no hay una relación evidente entre ambas. Lo cual pudiera ser que estos cambios poco significativos están en relación directa con la posibilidad de que el pos-tratamiento realizado induce la formación de pequeños precipitados muy finos a nivel manométrico que están co-precipitando en el rango de 3-6 horas de pos-tratamiento. Los cambios en las

propiedades mecánicas del acero tipo A en el sentido transversal presentan diferencias más claras que en el corte longitudinal mostradas en la Figura 6 del mismo acero. Esto se puede ver en las curvas esfuerzo deformación de las Figuras 8 y 9; estas diferencias no concuerdan con los promedios de tamaño de grano mostrados en la Tabla 3, en donde no hay variación clara en los tamaños de grano. Podemos ver que el comportamiento de las curvas a medida que el tiempo se incrementa hay hasta las 8 horas de pos-tratamiento hay una disminución de la resistencia a la fluencia y a la tensión en comparación con el acero de llegada. Sin embargo, a partir de las 8 hasta las 10 horas de pos-tratamiento sufre un incremento en la resistencia que es máximo a las 10 horas de pos-tratamiento. Alcanzándose valores de 551 MPa de resistencia a la tensión, en la Figura 9 se muestran los extremos encontrados en las propiedades mecánicas en tensión de este acero observándose claramente este efecto del pos-tratamiento.

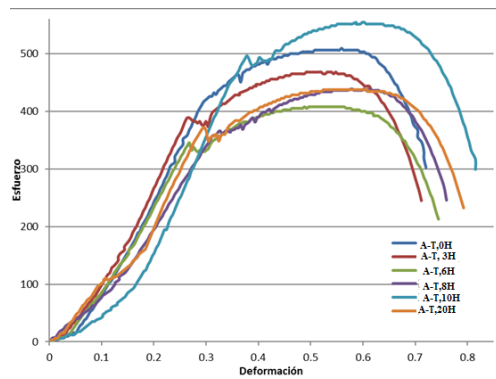


Figura 8. Curvas esfuerzo deformación de acero tipo A, cortes transversales

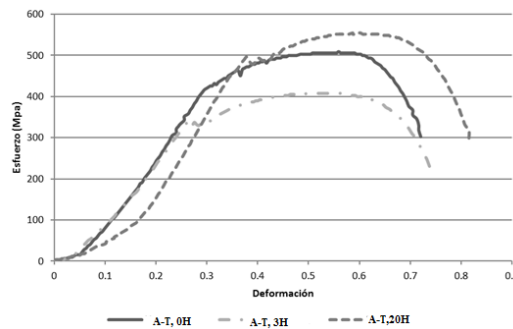


Figura 9. Curvas esfuerzo deformación de acero tipo A(T), 0, 6 y 10 horas de envejecido

Este comportamiento es probable que se deba a que el acero entre las 3-6 horas de pos-tratamiento se manifiesta un proceso de relajación-recuperación por lo que muestra una disminución los valores de resistencia, pero es a partir de las 8-10 horas en donde es probable que haya una co-precipitación de carburoso nitruros de V principalmente que inducen al endurecimiento relativo de este tipo de acero. Posteriormente a tiempos mayores (20 horas) el efecto endurecedor disminuye (Figura 9), esto se debe al aglutinamiento de estos nanoprecipitados de V que migran a los límites de grano, lo cual provoca un anclaje de los mismo más sin embargo la distribución al interior de los granos se modifica y esto causa una disminución en las propiedades mecánicas. Estas variaciones en propiedades no se logran evidenciar al observar las microestructuras y con los promedios de tamaño de grano medidos (Tablas 2 y 3, y Figuras 2 y 3). Esto se debe a que no es posible evidenciar estos cambios en microscopía óptica, ya que las magnificaciones empleadas son una limitante para analizar el comportamiento de los precipitados en ambas direcciones.

3.1.6 Caracterización mecánica acero tipo B

La Figura 10 presenta los resultados obtenidos en los ensayos de tensión realizados en el acero tipo B en el sentido de laminación. El grupo de curvas presentadas muestra un set de curvas entre las 3-8 horas de pos-tratamiento que presentan propiedades mecánicas distintas en comparación con la muestra de llegada y las tratadas a 10 y 20 horas. En el rango de 3-8 horas la resistencia a la fluencia y a la tensión máxima es mayor y a tiempos mayores se reduce. Este comportamiento se asemeja a un clásico efecto de un envejecido artificial [17], en donde en este rango de tiempo de pos-tratamiento las propiedades se incrementan, esto como consecuencia de una eficaz distribución de los co-precipitados en la matriz apoyado de un anclaje en el límite de grano, por efecto de la temperatura, pero al seguir estimulando la difusión a mayor tiempo de pos-tratamiento, se forman aglomeraciones y/o crecimientos de estas fases secundarias, así las propiedades mecánicas decaen derivado de un posible sobre envejecido [17], [18]. Además, es posible que durante el rango de tiempos de pos-tratamiento se esté evidenciando procesos de recuperación-recristalización, los cuales al ver los tamaños de grano promedio obtenidos (Tabla 4), muestran un ligero aumento en el valor del tamaño promedio de los granos. Esto es que el tamaño tiende a ser más fino y por consecuencia un incremento en sus propiedades de resistencia. La Figura 11 muestra solo comparación de las muestras en sus extremos, esto es la que presento una mayor y menor resistencia en comparación con las de llegada.

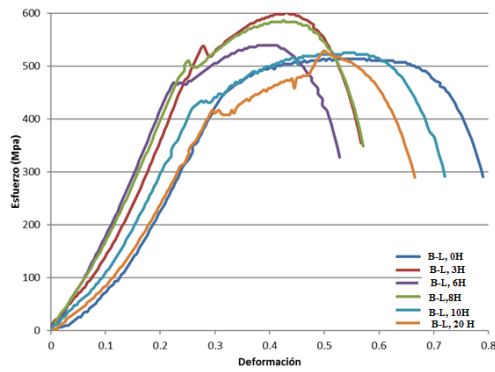


Figura 10. Curvas esfuerzo deformación de acero tipo B cortes longitudinales

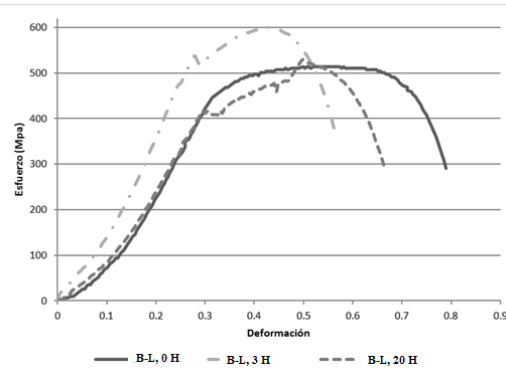


Figura 11. Curvas esfuerzo deformación de acero tipo B(L), 0, 3 y 20 horas de envejecido

En la Figura 12 se presentan las curvas obtenidas en los ensayos de tensión para el acero tipo B en el sentido transversal. En este sentido es muy evidente que hay un cambio en las propiedades en todos los tiempos de pos-tratamiento en comparación con la muestra de llegada. En este caso el efecto del pos-tratamiento en iniciar una co-precipitación se logra desde las 3 horas y sigue su efecto hasta las 20 horas no logrando observar una disminución aparente en las propiedades mecánicas después de este tiempo. El sentido transversal de este tipo de acero presenta un tamaño de grano mayor sin grandes (Tabla 5) es muy probable que los fenómenos de recuperación-recristalización estén interactuando desde los tiempos iniciales de pos-tratamiento y que inducen un incremento en la densidad de límites de grano lo cual por consecuencia aumenta las propiedades de resistencia aunado al efecto endurecedor de la co-precipitación. La Figura 13 se muestran las curvas para solo comparar con relación al acero de llegada y los tratamientos que presentaron una mayor y menor resistencia.

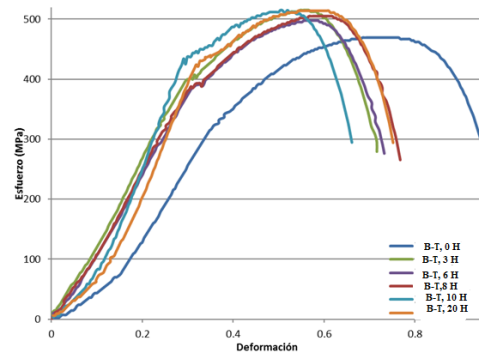


Figura 12. Curvas esfuerzo deformación de acero tipo B cortes transversales

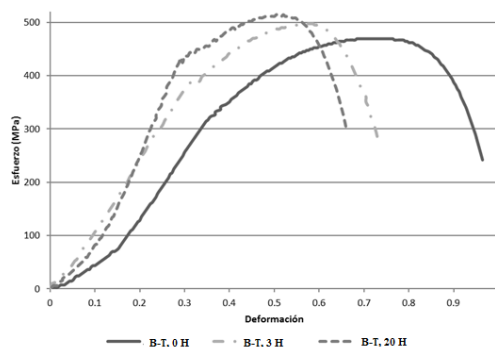


Figura 13. Curvas esfuerzo deformación de acero tipo B(T), 0, 3 y 20 horas de envejecido

3.1.7 Resumen de las propiedades mecánicas medidas

En las Tablas 6 y 7 se muestran en forma resumida los resultados integrados de las propiedades mecánicas obtenidas para el acero tipo A en sentido longitudinal y en sentido transversal, respectivamente. Las tablas además de los valores de los resultados del ensayo de tensión, se muestran los valores de los ensayos de microdureza efectuados en este tipo de acero (Figura 13). Así como también se muestran los resultados de la elongación y su reducción de área. La variación en dureza concuerda con los resultados ya discutidos en relación a su resistencia máxima y a la fluencia de este tipo de acero en ambas direcciones. En cuanto a su elongación y reducción de área, no hay variaciones substanciales, lo cual indica que este tipo de acero no pierde su tenacidad con el tiempo de tratamiento

Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero tipo A en sentido longitudinal

Probetas	σ_0 (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	MHV	% RA	% E
A-L, 0H	411	498	275	443	78	36
A-L, 3H	444	500	277	441	74	41
A-L, 6H	453	486	266	405	75	40
A-L, 8H	422	482	267	395	74	44
A-L, 10H	419	477	264	400	73	42
A-L, 20H	415	478	268	407	75	44

Tabla 7. Propiedades mecánicas del acero tipo A en sentido transversal

Probetas	σ_0 (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	MHV	% RA	% E
A-T, 0H	417	506	302	408	74	45
A-T, 3H	389	468	245	377	75	47
A-T, 6H	345	408	213	384	77	40
A-T, 8H	356	436	246	423	74	39
A-T, 10H	496	551	299	434	70	48
A-T, 20H	372	437	232	370	73	43

Tablas 7 y 8, muestran en forma resumida los resultados obtenidos en los ensayos de tensión realizados en el acero tipo B en ambas direcciones. Estos resultados ya fueron discutidos previamente para este tipo de acero. Ahora bien, en cuanto a los resultados mostrados de dureza, estos muestran la misma tendencia en relación a los resultados obtenidos de resistencia máxima y esfuerzo de cedencia, en las dos direcciones de corte (L y T) (Figura 13).

En cuanto a los parámetros de elongación y de reducción de área, estos muestran muy poca variación con relación a los tiempos de tratamiento. Estas variaciones es muy común observarlas en estos ensayos así realizados, pues la forma en que se determinan es muy azarosa, ya que es muy posible insertar errores de medición, y es por lo general un método relativamente arcaico. Descontando estas implicaciones, podemos decir que la tenacidad de este tipo de acero varía muy poco, y realmente no se modifica con el tiempo de tratamiento térmico.

Tabla 7. Propiedades mecánicas del acero B-L

Probetas	σ_0 (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	MHV	% RA	% E
B-L, 0 H	446	513	291	439	69	36
B-L, 3 H	538	601	355	686	68	35
B-L, 6 H	468	539	327	537	71	32
B-L, 8 H	510	583	349	543	69	34
B-L, 10H	428	525	292	462	71	30
B-L, 20H	417	529	290	474	71	31

Tabla 8. Propiedades mecánicas del acero B-T

Probetas	σ_0 (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	MHV	% RA	% E
B(T)-0H	344	469	242	389	77	46
B(T)-3H	400	515	279	373	77	32
B(T)-6H	391	498	276	360	76	36
B(T)-8H	388	505	266	356	78	34
B(T)-10H	434	515	295	482	70	36
B(T)-20H	424	514	294	412	71	40

3.2 Mediciones de dureza obtenidas

La Figura 13 muestra los valores de dureza obtenidas en las distintas probetas de acero A y B en las dos direcciones L y T, a los distintos tiempos de envejecido. La Tabla 9 representa los valores calculados de la tenacidad de los tipos de acero en ambas direcciones, y fueron determinados evaluando el área bajo la curva de los ensayos de tensión. Los resultados indican claramente que la tenacidad no varía con los tiempos de tratamiento térmico realizados. Esto es de vital importancia ya que lo que en un inicio se buscó era que la resistencia de estos aceros pudiese aumentar, pero sin que existieran cambios en su tenacidad.

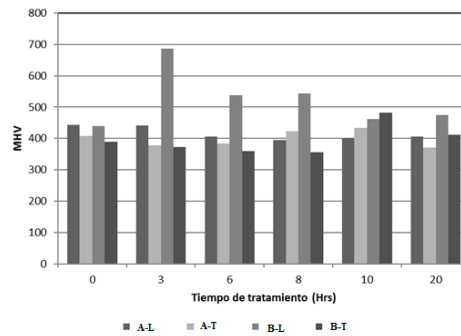


Figura 13. Valores de dureza MHV obtenidos en los dos tipos de acero, en ambas direcciones, en función del tiempo de tratamiento térmico

Tabla 9. Valores de tenacidad calculados de los aceros A y B en las direcciones L y T

Tiempo (hrs)	Acero tipo A(L)	Acero tipo A(T)	Acero tipo B(L)	Acero tipo B(T)
0 hrs	0.257	0.250	0.285	0.300
3 hrs	0.264	0.233	0.225	0.258
6 hrs	0.274	0.216	0.198	0.245
8 hrs	0.281	0.227	0.231	0.266
10 hrs	0.271	0.292	0.267	0.224
20 hrs	0.264	0.245	0.219	0.258

La Tabla 10 presenta los incrementos en resistencia máxima y resistencia a la fluencia en ambos tipos de acero en sus dos direcciones. Estos valores son meramente una comparación efectuada para enmarcar que existe un tiempo de tratamiento térmico que afecta más estos valores. Citando que el acero A en sentido transversal, muestra un incremento a las 10 hrs de tratamiento, y en sentido longitudinal esto no se observa. En el acero tipo B longitudinal el tiempo está entre 3-8 hrs de tratamiento siendo los más representativos que se encuentran en el acero tipo B L, y en el sentido B-T, esta manifestación substancial en la resistencia se obtiene a partir de las 10 hrs de tratamiento, sin embargo, hay un incremento desde el inicio del tratamiento térmico.

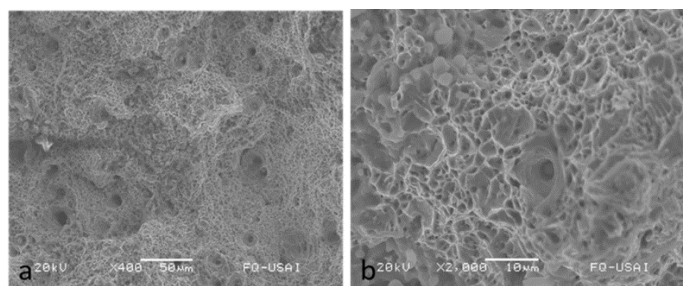
Estas variaciones en la resistencia se atribuyen muy específicamente a que hay una coprecipitación por efecto del tiempo y de la temperatura, de los elementos microaleantes que están en solución sólida y que se manifiestan precipitándose a partir de los precipitados existentes, y de los carburos de Fe localizados tanto en la matriz de ferrita, como formando parte de la fase de perlita y/o bainita superior de la microestructura original, producida por el procesamiento termomecánico de origen. Otra de las fuentes de contribución que se han establecido, es que el acero tipo B en su composición química contiene un mayor porcentaje en peso de concentración de Cu (Tabla 1) lo cual es una fuente reconocida de fases ricas en Cu [10], [11], [18], que endurece por precipitación la matriz de un tipo de aceros microaleados, diseñados para incrementar su resistencia a la corrosión atmosférica [18].

Tabla 10. Incrementos en la resistencia a la fluencia y resistencia máxima de los aceros A y B en las dos direcciones
Acero A-L Acero A-T Acero B-L Acero B-T

Tiempo (hrs)	Δf (Mpa)	ΔR (Mpa)	Δf (Mpa)	ΔR (Mpa)	Δf (Mpa)	ΔR (Mpa)	Δf (Mpa)	ΔR (Mpa)
3 hrs	33	2	-28	-38	92	87	56	46
6 hrs	42	-12	-71	-98	23	25	47	29
8 hrs	11	-16	-61	-70	64	69	45	36
10 hrs	8	-21	80	45	-18	12	91	45
20 hrs	4	-20	-45	-69	-29	16	81	45

3.2.1 Caracterización de las fracturas obtenidas

En las Figuras 14 a y b se muestran tipos de fractura típicas encontradas en este acero, en la cual es evidente que la fractura es esencialmente dúctil, lo cual corrobora que estos aceros no pierden ductilidad por efecto del tiempo de pos-tratamiento térmico realizado.



Figuras 14. Micrografías de las fracturas típicas obtenidas en dos magnificaciones en el acero tipo A transversal

3.2.2 Caracterización microestructural por microscopía electrónica de transmisión.

En un intento por realizar una caracterización inicial de la microestructura a mayor detalle de este tipo de acero, en ciertas etapas del postratamiento térmico. Se realizaron algunas observaciones en microscopía de electrónica de transmisión, con el propósito de poder evidenciar la precipitación existente, que es la causante del incremento en la resistencia de este tipo de acero. La micrografía obtenida y mostrada en la Figura 15 a, b y c. En general se muestra una región obtenida del acero tipo B de llegada, en la cual se observan (ver marca) los precipitados existentes de origen después del tratamiento termomecánico. Estos precipitados están localizados en la matriz de ferrita y son de gran tamaño (0-100 nm), y de forma irregular, reconocidos por su forma como precipitados típicos de Ti y Nb [2], [7], [16].

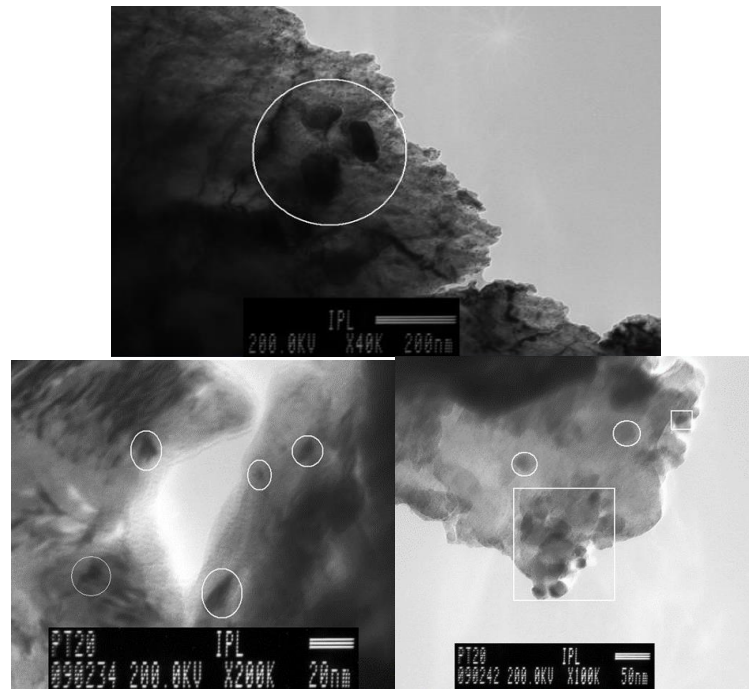


Figura 15. Micrográficas obtenidas por microscopía electrónica de transmisión en una región específica del acero B longitudinal: a) región en donde se muestran precipitados aglomerados, b) acero B-L, 8 hrs de envejecido y c) acero B-L 20 hrs de envejecido

Las Figuras mostradas (Figuras 15b y 15c), son las regiones observadas del acero tipo B a 8 y 20 hrs de tratamiento respectivamente. Se puede observar la aparición de precipitados más pequeños del orden 5-10 nm aproximadamente, son de forma irregular, muy finos y están algunos aglomerados (Figura 15b), por la forma y a estas magnificaciones, no es posible predecir qué tipos de precipitados se trata. Sin embargo, es evidente que hay una masiva co-precipitación muy fina y dispersa ubicada en matriz de ferrita, e interaccionando con las laminillas de carburo de Fe de la fase de perlita y/o bainita superior. Estos finos precipitados que aparecen durante el postratamiento, son los indicios microestructurales que modifican la resistencia de este tipo de aceros, pues al precipitarse tanto en matriz de la ferrita, e interaccionando con otras fases presentes, y con los defectos (dislocaciones-vacancias), esto da por consecuencia un incremento en las propiedades mecánicas mostradas anteriormente.

4. CONCLUSIONES

- El promedio del tamaño de grano no es evidencia para relacionar la variación en las propiedades mecánicas de estos aceros, ya que no se puede observar los cambios de coprecipitación después del pos-tratamiento, aun cuando muestran la solubilización de la bainita como la ferrita basáltica como la de tipo Widmanstatten.
- Los cambios en las propiedades mecánicas será más responsabilidad de la co-precipitación en la matriz del material que el promedio de tamaño de grano, la cual promueve una difusión y distribución en la red cristalina de los aceros.
- Los cambios a raíz del pos-tratamiento se dan en el intervalo de las 0 a 8 horas en los cortes longitudinales, mientras en uno de los cortes transversales se llevan en el intervalo de 0 a 10 horas de tratamiento.
- El efecto de mejoras más significativas en el acero tipo B después del pos-tratamiento térmico, se debe a la variación de cobre en la composición química, por el efecto co-precipitación de ϵ -Cu.
- El tipo, distribución y tamaño de los microprecipitados, es origen fundamental en la variación de propiedades mecánicas en este tipo de aceros.

- En sentido longitudinal se resiste menos al postratamiento que el sentido transversal el cambio microestructural de recuperación como co-precipitación presentes pro el tratamiento térmico es más retardado
- Presentando el mecanismo de recuperación de grano a las 20 horas que da como resultado una mezcla de tamaños de grano.

Agradecimientos

Los autores agradecen el valioso apoyo del I.Q. Iván Puente Lee de la USAI, Facultad de Química UNAM, y del Ing. Mec, H. Hugo Hinojosa del Instituto de Ciencias Físicas, UNAM por su trabajo en el taller mecánico. También se agradece al proyecto Papitt-UNAM, IT102619.

REFERENCIAS

- [1] T. Gladman, *The Physical Metallurgy of Microalloyed steels*: The Institute of Materials, The London, UK, 1st Edition, 1997.
- [2] K. B. Kang, S.G. Hong and H.J. Jun, "Evolution of precipitates in the Nb-Ti-V microalloyed HSLA steels during reheating", *Scripta Materialia*, 28, pp.1201-1206, 2003.
- [3] G. Melek and A.K. Wang, "The history of microalloyed steels", In Proc. International Conference on HSLA Steels 85, 1(1), pp. 15-20, 1986
- [4] T. Gladman, "HSLA Steels", In Proc. Beijing 1990: TMS Warrendale, pp.3-15, 1992
- [5] T. M. Noren, "Special Report on Nb as Microalloying Element in Steel and its Effect on Welding Technology", Ship Structure Committee, Washington, DC, 1963.
- [6] N.J. Petch, In Proc. Swampscott Conf.: John Wiley and Sons, New York, pp.54-62, 1959.
- [7] H. K. D. H. Badeshia and R.W.K. Honeycombe, *Steels Microstructure and Properties*: Butterworth-Heinemann, Portland, Oregon, USA, 3rd Ed., 2006.
- [8] W.B. Morrison, "Microalloy steel- the beginning", *Materials Science and Technology*, vol.25 (no.9) pp. 1066- 1073, 2009.
- [9] Annual Book of Standards, ASTM E8M-04, Standard Test Methods for Tension Testing and Materials: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008,
- [10] R. D. K. Misra, Z. Jia, R. O'Malley and S.J. Jansto, "Precipitation behavior during slab thermomechanical processing and isothermal aging of Cu-bearing Nb microalloyed high strength structural steels", *Materials Science and Engineering A*, 528 (29-30) pp.8772-8780, 2011
- [11] S. Chatterjee and A. Ghosh, "Characterization of precipitates in ULC Cu bearing high strength steel: TEM study", *Materials Characterization*, 55, pp.298-306, 2005
- [12] A. J. DeArdo, D.C. Houghton, and G.C. Weatherly, "Thermomechanical processing of microalloying austenite", *Metallurgical Society of AIME*, New York, 1982.
- [13] R. D. K. Misra, D. Panda, S. Jansto, S. Shanmugam, and N. Tanniru, "Precipitation in V bearing microalloyed steel containing low concentrations of Ti and Nb", *Materials Science and Technology*, 21 (8), pp.883-892, 2005.
- [14] G. Aimin, R.D.K. Misra, X. Jinqiao, B. Guo, S.G. Jansto, "Ultra-high strength and low yield ratio of Nb-microalloyed 900 MPa pipeline steel with nano/ultrafine bainitic lath", *Materials Science and Engineering A* 527 (16-17), pp.3886-3892, 2010.
- [15] S. Gunduz and R.C. Cocharne, "Influence of cooling rate and tempering on precipitation and hardness of V microalloyed steel", *Materials and Design*, 26(6), pp. 486-492, 2005.
- [16] D. Rasouli, Sh. Kameneh Asl, A. Akbarzadeh, and G.H. Daneshi, "Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of microalloyed forging steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 206 (1-3) pp. 92-98, 2008.
- [17] A. K. Hingwe and B.L. Bramfitt, *Metals Handbook, Heat Treating*, American Society for Metals, Metals Park, OH, United States of America, 10th Edition, 1990.
- [18] A. Gosh, B. Mishra, S. Das and S. Chatterjee, "An ultra-low C Cu bearing steel: Influence of thermomechanical processing and aging heat treatment on structure and properties", *Materials Science and Engineering A* (1-2), pp. 43-55, 2004.

Divergencias y convergencias de las metodologías TRIZ y Design Thinking en el contexto del Fuzzy Front End

Jovany Uribe O.¹

Paulo Carlos K.²

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Brasil

El inicio del proceso de desarrollo de productos conocido en la literatura como Fuzzy Front End (FFE), se caracteriza por las grandes incertidumbres al tiempo que también grandes posibilidades, siendo particularmente relevante para productos con alto grado de innovación, definida esta como la novedad técnica y/o nuevas características para el usuario. Estudios muestran cómo las empresas presentan bajo nivel de éxito en los nuevos productos desarrollados, explicado en parte por la poca utilización de metodologías de apoyo al desarrollo de productos. El presente capítulo tiene como objetivo contrastar las metodologías TRIZ, que tiene un enfoque técnico y Design Thinking (DT) centrada en el usuario, en el contexto del inicio del proceso de desarrollo de productos, identificando las fases y actividades en las que se utilizan, los puntos fuertes y débiles, y cómo pueden ser complementadas las dos metodologías, particularmente para productos innovadores. La investigación se realizó a partir de una revisión y evaluación de la fundamentación teórica de las dos metodologías. Los resultados muestran cómo las metodologías TRIZ y DT se pueden utilizar y complementar en diferentes fases del FFE, como prospección de oportunidades, estructuración de las oportunidades, entendimiento del problema, generación y evaluación de conceptos.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un nuevo producto comprende desde la identificación de una oportunidad, el diseño del producto, desarrollo de la producción, el lanzamiento al mercado, inclusive algunas actividades de pos-venta, hasta la discontinuación del producto. Diferentes investigadores han identificado el inicio del proceso conocido en la literatura como Fuzzy Front End como la etapa más crítica del proceso de desarrollo de nuevos productos, siendo más relevante con el incremento grado de innovación del nuevo producto [1] - [3]. Igualmente, autores han propuesto buenas prácticas y modelos para realizar el FFE [2], [4] – [8]. Sin embargo, falta consolidar el tema en relación a las evaluaciones reales de modelos, la propuesta de modelos específicos y utilizables y la inserción de técnicas y metodologías para realizar las actividades [9] , [10]. De otro lado variadas técnicas y metodologías que auxilian el desarrollo de nuevos productos han sido concebidas entre estas están TRIZ y Design Thinking (DT), al compararlas en cuanto a su origen, proceso y filosofía, se entiende que son metodologías muy diferentes siendo la TRIZ con foco en los aspectos técnicos y DT centrada en el usuario, mas también se diferencian en su forma de raciocinio y proceso.

A partir de la comparación de estas dos metodologías, es inferido que en el contexto de FFE se pueden complementar para ofrecer un direccionamiento tanto tecnológico como humano al desarrollo, complemento necesario en algunos sectores como el caso de equipamientos médicos donde las necesidades funcionales o latentes de los múltiples usuarios, al tiempo que la integración de diversos campos tecnológicos es esencial para lograr el éxito técnico y económico del nuevo producto. Así, el presente capítulo tiene como objetivo contrastar las metodologías TRIZ y DT en el contexto de FFE, identificando cómo pueden ser complementadas las dos metodologías en el FFE, particularmente para productos con alto grado de innovación, desde la perspectiva tecnológica y/o usuario. La metodología utilizada fue una investigación en la literatura sobre FFE, TRIZ y DT.

La literatura sobre innovación y desarrollo de productos indican innovación radical, disruptiva o discontinua, entre otras denominaciones, en contraposición a innovación incremental, en la cual se obtienen nuevas versiones de productos mejoradas o adecuadas. Salerno y Gomes [11] indican como entre innovación incremental y radical existe todo un espectro. El presente trabajo está centrado en el desarrollo de productos con alto grado de innovación, que son catalogados como productos encuadrados en innovación más que incremental, mas no al punto de innovación radical definida esta como un producto proceso o servicio, que presenta características de desempeño sin precedentes o características ya conocidas que promuevan mejoras significativas de desempeño o costo y transformen los mercados existentes o creen nuevos mercados [12].

Aquí cabe la aclaración que los algunos de los autores sobre FFE consultados indican sus modelos para innovación radical, sin embargo, al analizar los artículos están encuadrados en innovación más que incremental, por tanto, en el presente capítulo nos referiremos a estos como modelos para alto grado de innovación. Los resultados de este trabajo permiten orientar los esfuerzos de la integración de las dos metodologías TRIZ y DT en el FFE específicamente para productos con alto grado de innovación, lo que permite hacer operativo este proceso y facilitar el desarrollo de nuevos productos, desde la exploración del entorno, la identificación oportunidades direccionada por problemas y necesidades humanas o avances tecnológicos, hasta la propuesta de conceptos que atiendan las oportunidades encontradas, diferente de hacer una copia o mejora de un producto. Este trabajo hace parte de un proyecto de doctorado que tiene como objetivo la síntesis de una propuesta de FFE para dispositivos médicos con alto grado de innovación, integrando las metodologías TRIZ y Design Thinking.

¹ jovanyocampo@usp.br

² pckamins@usp.br

2. COMIENZO DIFUSO DEL PROYECTO

Los autores clásicos del desarrollo de productos en sus modelos proponen fases o actividades antes del proyecto de producto. Aunque no todos ellos indican en sus modelos el FFE, estos autores reconocen la relevancia de estas fases iniciales las cuales requieren una pequeña inversión, mas tienen una gran influencia en las características finales del nuevo producto. “El FFE inicia con una necesidad existente que pueden ser identificada y una tecnología existente que puede ofrecer solución a esta necesidad”, como indicaran Reinertsen y Smith [13], autores que acuñaron el termino FFE. Puede ser notado de la frase inicial como los direccionadores (“Drivers” termino en inglés muy utilizado en la literatura) principales son Usuario/Mercado y Tecnología.

Como se ha indicado anteriormente, diferentes autores han propuesto actividades y formas de relación de estas para estructurar el FFE. Destacan por su relevancia en la literatura las propuestas de Cooper [4], Khurana y Rosenthal, [5], Koen et al. [2] propuestas enmarcadas en innovación incremental, ya recientemente otros autores han propuesto modelos para ejecutar el FFE para alto grado de innovación [6], [8]. Como referido por Koen et al. [2] entre otros, el FFE es experimental, ambiguo y a veces caótico y con grandes incertidumbres “desestructurado”, en contraste con la estructura que busca eficiencia y orientación para el objetivo de la macro fase Desarrollo, característica que es más notoria con el aumento del grado de novedad del nuevo producto. Complementando esta idea, Reid y Brentani [6] indican como el FFE para productos incrementales, es fácil detectar y estructurar la oportunidad y transmitir la información a la organización. Ya en el caso de alto grado de innovación la detección, estructuración y transmisión de la información resulta dificultosa.

No existe un consenso claro sobre el alcance de FFE, las actividades o las metodologías que ayudan al FFE. Los autores Reid y Brentani [6] y Costa y Toledo [10] identifican el Inicial FFE (early FFE) donde la identificación de oportunidades y reunión de informaciones constituyen el núcleo y el Avanzado FFE (Later FFE) donde la generación de ideas y desarrollo de conceptos para la oportunidad identificadas son la esencia. Al analizar los autores indicados es posible encontrar como el FFE ha evolucionado, tomando la idea del Inicial FFE, la problemática evoluciono desde la generación de ideas y consideración de la tecnología y el mercado [4], la identificación de oportunidades y consideración de la estrategia de producto [5], influencia de factores externos y apoyo gerencial como elemento relevante [2], en los modelos considerados de innovación incremental. Ya los modelos encuadrados en alto grado de innovación la problemática inicia con la detección e interpretación de oportunidades [6], el mapeo del cliente para encontrar e interpretar el problema (oportunidad) [8], es notado como el entender algo que ocurre en el entorno y traducirlo en una oportunidad, estructurarla dentro del negocio es más dificultoso para el alto grado de innovación.

Ya en el Avanzado FFE, a partir del análisis de los autores indicados, puede advertirse como, la problemática pasó de definición del concepto en la innovación incremental. Para generar refinar y seleccionar ideas, y desarrollar evaluar y seleccionar conceptos, además de los flujos de información y paso del FFE al proyecto formal, en los modelos encuadrados en alto grado de innovación. Adicionalmente, los modelos de FFE pasaron de un enfoque lineal para procesos iterativos, y es notado como los modelos definidos para productos más innovadores [2], [6], [8], son basados en análisis teóricos y algunos estudios de caso, mas no indican los autores evaluaciones con aplicaciones prácticas. Así mismo estos modelos son más conceptuales que descriptivos, con niveles de detalle bajo, lo que dificulta su aplicación y en lo referente a técnicas y metodologías de apoyo, el tema es poco tratado.

Concluyendo, desarrollar productos en el contexto incremental es tratar con un mundo que se conoce y es requerido tratar con riesgos, donde se conocen las probabilidades y consecuencias, de otro lado al desarrollar productos con alto grado de innovación, se está adentrando en lo desconocido y el reto es disminuir las incertidumbres, las cuales son falta de conocimiento que pueden tener consecuencias, mas no se sabe cuáles.

3. TRIZ

El acrónimo TRIZ proviene del ruso, y en español podría traducirse como Teoría de Resolución de Problemas Inventivo. Es una metodología sistemática para resolver problemas del tipo inventivo de forma eficiente, efectiva y creativa.

3.1 Origen

La TRIZ comenzó a desarrollarse en la década de 1940, por el ingeniero y científico ruso Genrich Altshuller, aunque el primer texto fue publicado en 1956 [14] posteriormente la TRIZ ha sido desarrollada por sus colegas. En occidente, la TRIZ fue conocida en los años 1990 después de la perestroika en la Unión Soviética, extendiéndose rápidamente en los distintos países. Inicialmente, la TRIZ fue concebida para problemas tecnológicos, sin embargo, con el transcurso del tiempo, ha ampliado su campo a otras áreas, tales como ciencias sociales, biología y otras [15]. El trabajo inicial de Altshuller fue dedicado a refutar la forma de resolver problemas, por medio de pruebas y error, y el desarrollo de un método científico para crear inventos. Desde el principio, con el estudio de patentes, fue evidente que las invenciones de alto nivel no permitían un compromiso entre requerimientos en conflicto, siendo la creación de nuevos

paradigmas, la eliminación o mitigación de estas contradicciones y después fue evidente la existencia de patrones en la evolución de los sistemas técnicos [16]. De esta forma Altshuller definió un problema inventivo como el que presenta al menos una contradicción, y definió contradicción como la situación en que el intento de mejorar una característica del sistema conduce a la degradación de otra. Estas contradicciones se resuelven normalmente por consenso entre las características en conflicto, sin embargo, la TRIZ ofrece posibilidades de descubrir soluciones en otros campos del conocimiento, teniendo la posibilidad de encontrar nuevos paradigmas de soluciones mejores que el consenso [14].

Para el desarrollo de la TRIZ, se estudiaron inicialmente 200.000 patentes, y se clasificaron en cinco niveles de acuerdo con el grado inventivo, más en los desarrollos posteriores, los especialistas de la TRIZ analizaron aproximadamente 2 millones de patentes [17]. Altshuller [14] indica que los problemas de nivel 1 tienen pocos elementos, requieren conocimientos básicos, un simple análisis es necesario para formular soluciones y el tiempo de solución es corto. Los problemas de nivel 4 tienen un gran número de elementos, los conocimientos requeridos son amplios, es difícil hacer un análisis del problema por la separación de los diferentes elementos de conocimiento, la solución requiere a largo plazo. Los problemas de nivel 2 y 3 están en un nivel intermedio; ya las patentes de nivel 5 se resolvieron con nuevos descubrimientos científicos. La TRIZ es adecuada para problema de los niveles 2, 3 y 4 [18]. La evolución de a TRIZ según [16], el autor distingue cinco fases en este desarrollo, a partir de las nociones iniciales de contradicciones, patrones de evolución, niveles inventivos, los autores fueron proponiendo técnicas que hacen operativas estas nociones, así la metodología está en desarrollo y refinación.

3.2 Descripción de la TRIZ

Funcionalmente, TRIZ está compuesta por técnicas basadas en la forma de resolver problemas similares en el pasado y responden a principios fundamentales de la forma en que evolucionan los sistemas técnicos. Estas técnicas permiten encontrar soluciones a problemas de tipo inventivo, en diferentes áreas de conocimiento, de forma sistemática y superando lo que ha sido denominado por Altshuller como "inercia psicológica". La metodología, básicamente, parte del problema específico, hace un análisis de la situación problema, llegando a una abstracción que permita encontrar un problema genérico, libre de la terminología técnica. Por lo tanto, se encuentran las soluciones genéricas y por último las soluciones se particularizan al problema específico, como se indica en la Figura 1, puede notarse en la figura como el paso directo del problema a la solución es el proceder de los métodos intuitivos de solución de problemas.

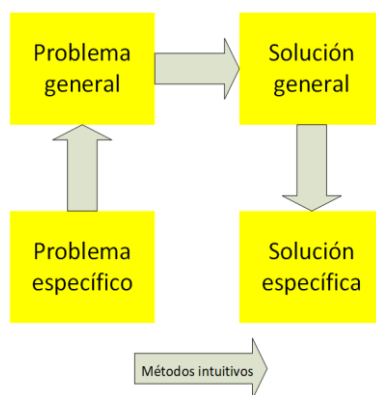


Figura 1. Estructura general de la TRIZ [17]

3.3 Filosofía de la TRIZ

La TRIZ ha sido descrita como metodología, caja de herramientas, ciencia, filosofía, entre otras [15], sin embargo, es una metodología sistemática para encontrar soluciones a problemas técnicos y generar sistemas técnicos innovadores, basada en el cuerpo de conocimiento con orientación humana según [14], [17]. Los principios generales de la TRIZ, son: idealidad, contradicciones, evolución, y recursos; filosóficamente, los mayores pilares de la TRIZ, son: la Idealidad y las Contradicciones [17]; ya, operativamente, los patrones de evolución de los sistemas técnicos, los recursos de la situación problema, y la idealidad son la base de la mayor parte de las técnicas de la TRIZ. La idealidad ayuda a determinar la dirección de la solución y las contradicciones indican los obstáculos que necesitan ser superados [14]. Altshuller comprobó con el análisis de las patentes, que las partes de los sistemas técnicos son desarrolladas, buscando la idealidad a lo largo de sus sucesivas versiones, de forma no uniforme, lo que provoca el surgimiento de contradicciones y la evolución futura de tales sistemas involucra la superación, o resolución, de estas contradicciones.

- *Idealidad*: el hecho de que los sistemas técnicos evolucionen, en el tiempo, aumentando las funciones útiles y disminuyendo las funciones inútiles, perjudiciales o neutrales, o el costo. La idealidad se deriva de la "máquina ideal", un sistema en el cual todas las partes ejecuta la mayor capacidad posible de la idea introducida por Altshuller [14], a partir de la identificación de que el objetivo no es el sistema sino la función que este realiza.

- *Contradicciones*: situación en que el intento de mejorar una característica del sistema conduce a la degradación de otra. Las contradicciones son indicativas de un problema de tipo inventivo, por la aparente incompatibilidad de características deseadas con el sistema. Al resolver la contradicción, se resuelve el problema. Hay dos tipos principales de ellas: las contradicciones técnicas y las contradicciones físicas. La contradicción técnica, que ocurre cuando un intento de mejorar ciertos atributos o funciones de un sistema lleva al deterioro de otros atributos de ese sistema; y la contradicción física, cuando hay inconsistentes requisitos para la condición física del mismo sistema, ejemplo para resolver el problema el sistema debe ser largo y corto o estar y no estar.
- *Evolución*: las tecnologías evolucionan según patrones y entendiendo esos patrones es posible predecir cómo va a evolucionar la tecnología y determinar la madurez de la misma; Altshuller observó que los sistemas técnicos generalmente siguen ciertas regularidades en su evolución, que se sintetizaron en patrones de evolución y se utilizan para determinar cómo evolucionan diferentes tecnologías y para desarrollar soluciones técnicas.
- *Recursos*: son los elementos de la situación problema o de su entorno, que pueden ser reestructurados para mejorar el sistema técnico. Cualquier problema es parte de un supersistema y es parte de la naturaleza, existe en el espacio y en el tiempo, consiste y/o usa sustancias y campos, y desempeña funciones. Por lo tanto, los recursos pueden agruparse en recursos naturales o medioambientales - cualquier material o campo que exista en la naturaleza; y recursos de tiempo - intervalos de tiempo antes del inicio, después de la conclusión y entre ciclos de un proceso tecnológico, modificación de la colocación preliminar de un subsistema, aplicación de pausas, uso de operaciones simultáneas, pueden ser formas de utilizar los recursos de tiempo. El diferencial o gradiente, como diferenciales de presión o temperatura o de propiedades de materiales, que sirven para cumplir el efecto deseado, son una forma de utilizar los recursos.

En síntesis, TRIZ es una metodología que se origina del análisis de la evolución tecnológica, y ofrece a los ingenieros heurísticas de la forma como los inventores del pasado resolvieron los problemas. TRIZ operativamente esta soportada en variadas herramientas, estas se pueden utilizar aisladamente o enmarcadas en un proceso general llamado ARIZ (algoritmo para la solución de problemas inventivos), más los diferentes autores indican formas diferentes de proceso de TRIZ.

4. DESIGN THINKING

Desde la academia se observa una preocupación por aclarar lo que realmente es el DT cuáles son sus orígenes, fundamentos teóricos, propuestas operativas, y directrices de procedimiento. Se encontraron dos líneas de investigación sobre DT la primera orientada a esclarecer el concepto y sus fundamentos teóricos, encontrándose un discurso a académico y uno organizacional y la segunda línea de investigación sobre DT está orientada al análisis de las prácticas de DT: directrices, fases del proceso, herramientas utilizadas. Desde la academia DT ha recibido algunas críticas entre ellas que no es algo nuevo [19], la falta de un proceso definido [19-21] y la falta de técnicas para la fase de proponer conceptos [19,21]. Estos aspectos van a ser ampliados a lo largo del capítulo.

4.1 Origen de Design Thinking

El DT tiene fundamento en el diseño centrado en el usuario (DCU), enfoque que coloca al individuo en el centro del proceso de desarrollo, identificando sus necesidades tanto funcionales como simbólicas. El DCU posee bases de la psicología social y humanista, partiendo de la comprensión del individuo y del ambiente, y, a partir de herramientas de la antropología, son llevadas estas necesidades al proyecto de producto [22]. El término "Design Thinking" se debe, al menos en lo que se refiere a su divulgación -a través de la literatura- a Peter Rowe, profesor de arquitectura y urbanismo en Harvard, que en 1987 conceptualizó el término "design thinking" en su libro de mismo nombre [23]. Sin embargo, el proceso de DT se asocia a la empresa IDEO, ya que los conceptos fueron ejemplificados en estudios de casos con mayor consistencia, y el concepto de DT tuvo sus elementos formalizados en fases [24], [25]. Según Brown y Wyatt [25], la forma de trabajo de IDEO pasó del diseño del producto de consumo para el diseño de la experiencia, y el término "Design Thinking" surgió para explicar su forma de proceder.

El artículo de Hassi y Laakso, [26] los cuales parten de la identificación previa de los discursos académico y organizacional del DT, hacen una línea de tiempo en la evolución de los dos discursos, a partir de los autores principales, que se muestra en la Figura 2, donde es posible advertir la evolución del pensamiento de diseño para el "Design Thinking"; igualmente, en la Figura 3 es mostrada la evolución del concepto DCU, que es el principal fundamento de DT. Diferentes autores han propuesto constructos importantes alrededor del concepto de Diseño, desde la creación de artefactos de Simon [27] la práctica reflexiva de Schon [28], la forma de raciocinio de Lawson [29] y Cross [30], solución de problemas de [31], creación de significado de Krippendorff [32]. Conceptos que se basaron bajo el rótulo de DT como: Forma de innovar [24], o ventaja competitiva [33].

Una de las críticas que ha recibido DT es que realmente no es algo nuevo o una simplificación del pensamiento de diseñador [19] No obstante los autores institucionales de DT a partir de conceptos diseminados en las prácticas de

los diseñadores, los cuales tienen implícito fundamento en la teoría del diseño, propusieron una metodología con una estructura, herramientas y directrices, aunque ninguno de los elementos es nuevo, el embasamiento sí presenta una forma nueva, otro aspecto importante de la novedad de DT es la utilización del pensamiento del diseñador en otros contextos, organizacional, ingeniería, entre otros, que ha mostrado validades en la práctica.

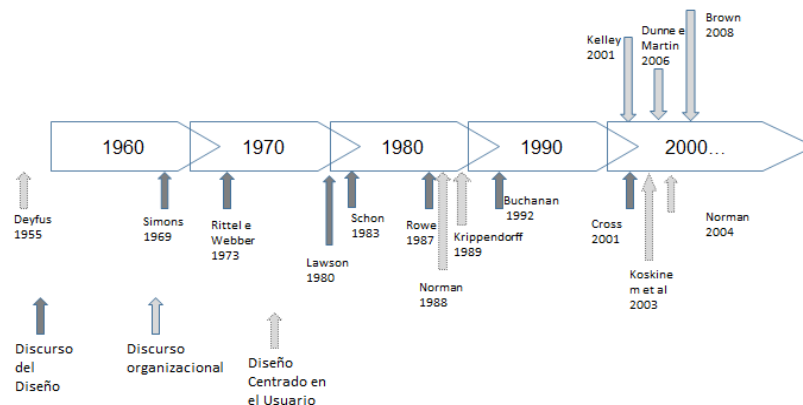


Figura 2. Evolución de Diseño para DT [26]

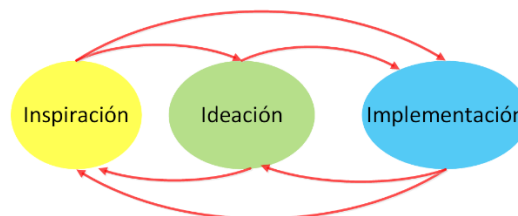


Figura 3. Proceso de DT [24]

4.2 Descripción de Design Thinking

El DT es una metodología para desarrollar productos que el usuario desea, que sean estratégicos para la empresa y viable tecnológicamente [24]. A partir de una observación profunda del usuario en su ambiente, se percibe la realidad de éste, y, con este entendimiento, se proponen soluciones, las cuales son prototípicas y probadas, desde las primeras fases, para profundizar la solución, teniendo la óptica del usuario.

Las fases del proceso varían, según Brown [24] las tres fases son: Inspiración a partir del problema; Ideación para proponer soluciones factibles y la Implementación, siendo un proceso iterativo. El Instituto de Diseño en Stanford [34] entidad líder en el entrenamiento en DT, propone: Empatizar, Definir, Idear, Prototipar y Evaluar. Autores como [21], [35] encontraron ocho propuestas procedimentales, encontrándose propuestas de tres hasta siete fases en el proceso de DT, mas al analizar los procedimientos indicados por los diferentes autores, a pesar de ser diferentes en las fases, la esencia es similar. El proceso de DT parte del entendimiento de la situación problema a partir de la óptica de los diferentes involucrados, expandiendo el espacio problema (divergencia), definido el problema (convergencia) son ideadas múltiples soluciones (divergencia), prototipadas y probadas rápidamente, para determinar el camino (solución de convergencia), la solución se va refinando y con nuevos y más refinados prototipos-testes en ciclos iterativos, se evalúan variantes hasta llegar a una solución adecuada.

Para la realización de las diferentes actividades son propuestas varias técnicas que ayuda efectuar estas, los autores institucionales como IDEO [36], Stanford University [37], proponen una serie de técnicas para las fases, se observó cómo las herramientas o técnicas sugeridas en el DT se centran más en el análisis de la situación problemática y la comprensión del usuario, puntos en los que los autores institucionales destacan y se identifican como las fortalezas de DT, además de las herramientas que contribuyen a la comunicación y el trabajo en equipo. Por otro lado, a pesar de que los autores institucionales siempre indican DT para generar conceptos innovadores, las técnicas de ideación son escasas: brainstorm, escenarios y co-creación, un término que tiene diferentes significados según [21], pudiéndose pensar que la convergencia de la solución va a depender del azar, de otro lado el trabajo en equipos multidisciplinarios, el pensar haciendo, e las múltiples iteraciones de entender, proponer y testar con usuarios, tal vez terminen compensando esta aleatoriedad.

4.3 Filosofía de Design Thinking

Fue descrito como DT es definido por un proceso y apoyado este proceso por técnicas para realizar las actividades. Adicionalmente autores académicos e institucionales indican unas directrices, que son los principios básicos sobre los cuales la metodología DT está sustentada en su aplicación. Estas directrices son elementos esenciales que son

enunciadas explícitamente por los autores institucionales o bien, implícitamente en el discurso de la propuesta de DT. A partir del análisis de los autores académicos [21], [26], [35], [38], además de los institucionales IDEO [36], Stanford University [37] y Rotman School of Management [33] se compendiaron las siguientes directrices:

- Enfoque centrado en el ser humano, todas las referencias se refieren a este tema, siendo considerado el pilar fundamental de la DT, relacionado con la empatía, la detección de las necesidades de los usuarios y la consideración de los diferentes involucrados.
- Interactividad, forma del proceso no lineal relacionado con la exploración de las opciones de múltiples opciones y el aprendizaje por medio de la experimentación con prototipos que permiten redirigir el proceso de manera constante.
- visualización, las ideas se materializan con prototipos o bosquejos, para comunicar, refinar, aprender y permitir a los involucrados experimentar el concepto.
- Pensamiento divergente y convergente, forma de trabajar en el diseño con divergencia para expandir los espacios de problema o de solución y convergencia para determinar el problema o elegir una forma de solución.
- Estilo de trabajo colaborativo, el proceso de DT se basa en actividades realizadas en equipo, con diferentes formaciones y perspectivas que amplían las posibilidades, y la inclusión de los involucrados en la solución.
- Resolución de problemas, los problemas sociales o el desarrollo de productos son difícilmente algorítmicos o estructurados, donde es posible definir un guion desde el principio, en la medida que se profundiza en la solución, se entiende el problema y la comprensión del problema influye en la solución, la ambigüedad como lo opuesto a lo determinístico, permite ampliar el espacio del problema y a veces el espacio de las posibles soluciones.
- Pensamiento integrador, las partes del proceso no están aisladas, el problema y la solución, el artefacto y los usuarios, el usuario y el contexto, la solución el usuario y la empresa.

En síntesis, DT es una metodología que se origina de la evolución del proceso de diseño, llevado a otros contextos, que presenta un proceso global que, si bien expuestos de forma diferentes por los autores institucionales apunta en la misma dirección, con unas técnicas que ayuda a realizar las actividades y este proceso es soportado por unas directrices, que crean un micro-clima, DT no es solo la suma de algunos elementos es relacionado a las formas de proceder y pensar.

5. TRIZ Y DESIGN THINKING EN EL FFE

5.1 Comparación TRIZ y DT

Cuando se habla de innovación sistemática, se relacionan dos términos que parecen contradictorios, innovación relacionada con la creatividad y sistemática relacionada con lo repetitivos. Sin embargo, estos dos aspectos están en las metodologías TRIZ y DT, ambas rompen el molde del genio solitario alcanzado por una idea, proporcionando un enfoque sistemático, presentan un proceso sistemático, al tiempo que hay espacio para la creatividad [39], y buscan convergir hacia una solución con una combinación equilibrada de análisis, generación de ideas (síntesis), y evaluación, apoyados por técnicas que facilitan la realización de las actividades. Pero, como se expuso, las dos metodologías son muy diferentes; TRIZ busca hacer un análisis del problema, desde la tecnología, haciendo una abstracción del problema para llegar a una solución, mientras que DT a partir de una inmersión realiza un entendimiento del usuario, para conocer sus necesidades y expectativas y a partir de sucesivas tentativas y errores, basados en prototipos y pruebas, llegar a una solución deseable.

La Tabla 1 muestra una comparación de TRIZ y DT, basada principalmente en: Pelt y Hey [40], que comparan TRIZ y DCU; Hentschel y Czinki [39] que comparan TRIZ y DT; y complementado con elementos del marco teórico utilizado. La inclusión en la discusión de la DCU es válida porque el DT es un enfoque basado en la DCU, pero con sus propios elementos, que fueron indicados. Las categorías de comparación del cuadro se basaron en [39]. La cuarta columna muestra los complementos (C) o divergencias (D). Por categorías, los complementos son: i) el objetivo - el ideal técnico de TRIZ con las necesidades y deseos de los involucrados en el DT; ii) la situación inicial, perspectiva y análisis técnico de TRIZ, complementado con el análisis de los involucrados en el DT; iii) el proceso- tienen en común la noción de proceso, pero son miradas muy diferentes en esta categoría, siendo más las divergencias que los complementos; iv) los resultados - en esta categoría TRIZ busca la mejor solución técnica y, desde el DT, la solución deseada, mientras que la forma de expresar el resultado de TRIZ nos indica un resultado tangible que puede ser transformado en una visualización o escenario con DT; v) la filosofía puede ser señalada como un complemento: a) con el DT podemos encontrar el problema a partir del énfasis en la observación de los involucrados y con el TRIZ podemos definirlo con el énfasis en la abstracción del problema; b) el TRIZ presenta una dirección de solución, relacionando con otras áreas de conocimiento, complementada con el equipo multidisciplinario del DT y el uso intensivo de Braintorming, para encontrar soluciones tangibles en la dirección indicada en el TRIZ. En esta categoría hay divergencias relacionadas con la lógica del TRIZ y la intuición del DT.

Tabla 1. Comparación de TRIZ y Design Thinking

Categoría	TRIZ	Design Thinking	
Orígen	Derivada del análisis de patentes y tecnología	Derivada de la experiencia y éxito comercial de proyectos, con bases en la teoría de diseño	
Objetivo	Con foco en la factibilidad técnica e/o viabilidad económica Centrado en lo tecnológico y económico	Con foco en las necesidades y deseos de los humanos Centrado en el usuario	C
	Probable avance tecnológico	Probable avance en la aceptación, por el centro en los involucrados	C
Situación inicial	Problema técnico complejo	Problema difuso (<i>wiked problem</i>), con personas involucradas	C
	Declaración del problema basado en contradicciones e insuficiencia técnica y/o económica	Declaración de problemas basada en la detección de partes interesadas / detección de necesidades	C
	Tan completa como sea posible	Compilación y selección de aspectos relevantes de los involucrados	D
	Análisis inicial del sistema	Análisis inicial de los involucrados	C
Proceso	Enfoque altamente estructurado secuencial y procesal, en el que se tiene una fase de análisis, después una fase de solución y una de evaluación	Enfoque poco estructurado y/o altamente iterativo, en el que se tiene una fase de análisis, después una fase de solución y una evaluación	D
	Proceso paso a paso para la TRIZ general y para las herramientas individuales	Vívido: secuencia espontánea de fases, guiado por un proceso de referencia / iterativo y evolutivo	D
	Proceso dirigido por análisis de causa y efecto	Proceso dirigido por empatía	C
	Basado en conocimientos y datos exactos	Basado en creatividad y ambigüedad	D
	Proceso sistemático, con uso intensivo de Herramientas	Proceso sistemático, con uso intensivo de herramientas	
	Puede ser difícil definir cuál es la más adecuada herramienta en casos reales	Puede ser difícil definir cuál es la más adecuada herramienta en casos reales	
	Diferentes propuestas procedimentales, dificultan un consenso y entendimiento	Diferentes propuestas procedimentales, dificultan un consenso y entendimiento	
	La aplicación más que la utilización de técnicas es un entendimiento y aplicación de algunos principios	La aplicación más que la utilización de técnicas es un entendimiento y aplicación de algunos principios	
	La mejor solución técnica	La más deseable solución	C
	Solución inicial presentada en nivel de abstracción	Solución presentada como ejemplo, un prototipo básico, un escenario	
Resultado	Resultado frecuentemente es claramente definible e tangible	Resultado frecuentemente tiene características de una visión, escenario o deseo	C
Filosofía	Prescribe "que" y "como"; definición del problema	Describe "por qué"; encontrar el problema	C
	Entendimiento profundo da evolución de la tecnología	Entendimiento profundo de los deseos e las necesidades humanas	C
	Hace vinculación entre el equipo de desarrollo y otras áreas de conocimiento	Equipos multidisciplinares, para integrar diferentes visiones y conocimientos	C
	Muy racional, direccionado por heurísticas	Muy intuitivo, direccionado por percepciones (<i>insight</i>)	D
	Procura encontrar una dirección óptima de la solución, disminuyendo la tentativa e error, para ahorrar trabajo	Procura muchas direcciones de solución, haciendo muchos ciclos de tentativa e error, desde el inicio del proceso, para ahorrar trabajo	C
	Puede ser trabajo en equipo, mas no es una condición, lo cual puede generar compartimento del conocimiento cuando es trabajado en equipo, o aislamiento cuando se procede solo	Muy centrado en el trabajo en equipo, con lo que se comparte el conocimiento generado, tanto del producto, cuanto del proceso de desarrollo	D
	Énfasis en la abstracción del problema, para evitar inercia psicológica y entender la esencia del problema	Énfasis en la observación y análisis de los involucrados y en el contexto, para entender a esencia del problema	C
	Más adecuado para incertidumbres técnicas	Más adecuado para incertidumbres con o usuario/mercado	C
	Fuerte en la búsqueda de soluciones, direccionamiento técnico	Débil en la búsqueda de soluciones. Las soluciones por <i>Braintorming</i> sin direccionamiento son por azar	C
	Considera la idealidad de la solución, más desde la perspectiva de diseñador	Considera a solución adecuada desde la perspectiva del usuario	C
Aprendizaje	Para quien va a utilizar la metodología, es claro que se requiere entrenamiento.	Para quien va a utilizar la metodología puede no ser claro que se requiere entrenamiento, pudiendo subestimar el aprendizaje	
	Difícil de aprender	Fácil de aprender	
	Difícil para aprender e aplicar	El proceso e sus herramientas son didácticas	
	Para un conocimiento profundo, requiere mucho tiempo y es complejo	Comparativamente fácil de alcanzar un conocimiento profundo; la cantidad de herramientas puede confundir	

Para finalizar la discusión de las dos metodologías, concluimos con dos citas: 1) Pelt y Hey [40] "Los profesionales de TRIZ definen el espacio del problema a menudo basándose en información insuficiente, debido a los requisitos de gestión y las perspectivas de marketing, porque utilizan sus experiencias en lugar de la investigación con el usuario, que puede dejar el proyecto en riesgo", y 2) Gurtner y Reinhardt [41] indican cómo una orientación exclusiva a los usuarios puede descuidar el lado tecnológico de la innovación, imponiendo una lente cognitiva a los generadores y gestores de ideas, teniendo en cuenta que en las oportunidades de la tecnología, a veces no está claro cómo pueden beneficiarse los usuarios.

5.2 Complementos de la TRIZ y Design Thinking en el FFE

Diferentes autores han propuesto una forma de integrar TRIZ con DT o DCU. Akay, Demiray y Kurt [42] sugieren una identificación de parámetros humanos en la situación del problema y, posteriormente, en el análisis, estos parámetros se tienen en cuenta en el proceso TRIZ, siendo un punto más centrado en la resolución de problemas específicos que en la generación de conceptos de producto. Otro aspecto es que los autores no indican metodologías para determinar los parámetros humanos del problema; Pelt y Hey, [40] indican la combinación de TRIZ con DCU para desarrollar productos de consumo. Desde la DCU se identifican las necesidades de los usuarios y el TRIZ permite generar conceptos de productos a estas necesidades. Los autores distinguen categorías de productos en las que el uso, la usabilidad o el significado son las cuestiones determinantes y cómo un enfoque DCU es más propicio en productos impulsados por la usabilidad y el significado y TRIZ más centrado en cuestiones de uso; pero para productos con varias consideraciones, las dos metodologías combinadas pueden generar resultados positivos.

Hentschel y Czinki [39] indican cómo el DT puede ser la puerta de entrada al uso de TRIZ. Al inicio del proyecto el problema es difuso y los elementos del problema y sus relaciones son difíciles de identificar; DT proporciona un enfoque "de juego" al modo de desafío y prueba, acumulando conocimiento sobre el problema, siendo un método sistemático fácilmente comprensible y utilizable, en el que TRIZ proporciona un entendimiento técnico dirigido a la generación de ideas. Los autores indican que TRIZ podría proporcionar un alto nivel de Braintorming. El estudio del FFE permitió establecer como para el desarrollo de productos en el contexto de alto grado de innovación, la dos fases del FFE tiene alcances diferentes que en innovación incremental, en el Inicial FFE se requiere explorar el entorno, y determinar oportunidades promisorias, para luego estructurarlas dentro de la empresa y en el Avanzado FFE se pretende, partiendo desde una oportunidad obtener conceptos de productos, pasando por un entendimiento, ideación, conceptualización y evaluación, en un ciclo interactivo para lograr un refinamiento de estos conceptos, como es mostrado en la Figura 4.

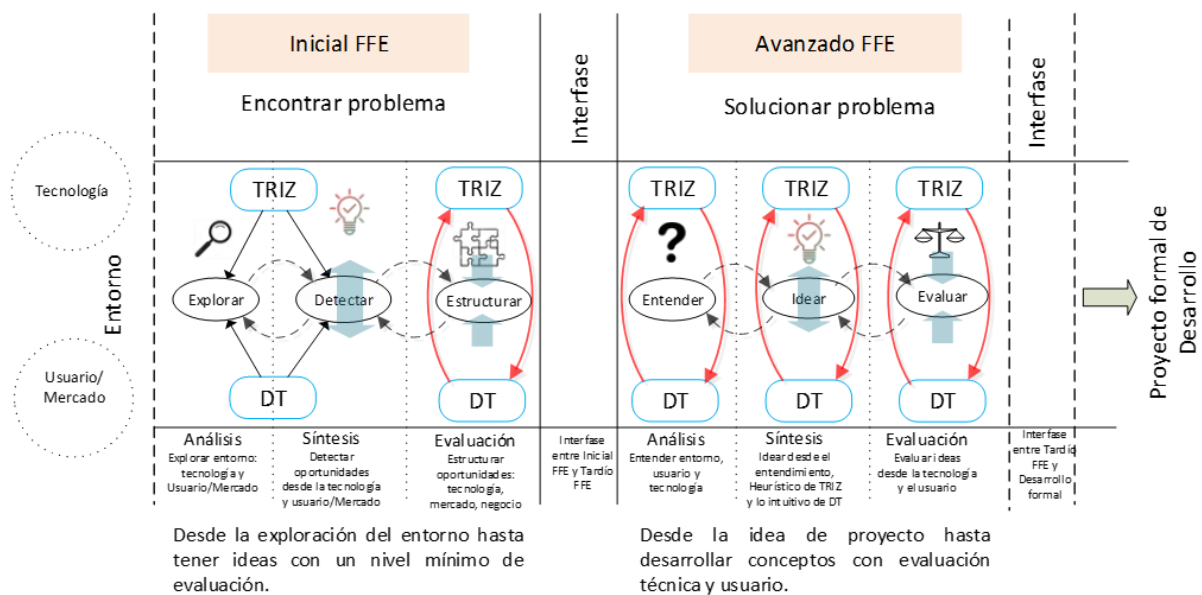


Figura 4. Integración de TRIZ y DT en el FFE

Consecuentemente, se plantea una integración de TRIZ y DT en las dos fases, como indica la Figura 4, donde se muestra la estructura general del FFE con sus dos fases y actividades en secuencia de tiempo, puede notarse que el Inicial FFE y Avanzado FFE son entendidos con tres actividades: análisis, para tener un entendimiento; síntesis, generación donde se amplía el espacio "divergencia" y evaluación, en la cual se entiende estructura y selecciona "convergencia". Así tenemos, en el Inicial FFE la exploración, para conseguir detectar oportunidades incomprensibles a priori. De forma similar la estructuración de la oportunidad que es un entendimiento y selección de las más promisorias, necesita más que decisión avance en la solución para estructurar las posibilidades tecnológicas, necesidades, expectativas y tamaños de mercado con los recursos y estrategia de la empresa.

En el Inicial FFE, la exploración del entorno técnico y de Usuario/Mercado es apoyada por las metodologías TRIZ y DT respectivamente, proceso que se realiza independientemente de este modo, la TRIZ ofrece la posibilidad de explorar el entorno de interés de la empresa desde lo técnico, los conceptos de evolución tecnológica e idealidad permiten encontrar espacios de innovación, de otro lado la metodología DT ofrece la posibilidad de entender el entorno desde el usuario, cambios comportamentales y como pueden ofrecer oportunidades. La estructuración de las oportunidades para alto grado de innovación, que como indicado implica el avanzar en la solución, para ir seleccionado las más promisorias, terminando con ideas de proyectos, entendiendo la oportunidad como una laguna o problemática en el mercado y la idea la forma embrionaria de solución [2]. Como es indicado en la Figura 4, aquí las metodologías TRIZ

y DT participan interactivamente procurando finalizar con ideas de nuevos productos alienadas con la evolución e ideal tecnológico, mas también con los deseos de los usuarios.

En el Avanzado FFE, se inicia con una idea de un producto, generalmente se parte del beneficio esperado para un grupo de personas. En las fases de entendimiento síntesis y evaluación, las metodologías TRIZ y DT están presentes y actúan de forma interactiva, los autores de la TRIZ [14], [16], [17] y de DT [24,37] indican como el análisis es una etapa fundamental en la resolución de un problema y proporciona los elementos para la solución (síntesis) y posterior evaluación. En el entendimiento la interacción de TRIZ y DT, proporciona un entendimiento más holístico de la situación, complementando no rivalizando, el entendimiento de la tecnología, su evolución natural, el ideal y la noción de recursos, con la comprensión del usuario a nivel de requerimientos funcionales que son más explícitos, hasta necesidades latentes. En la ideación al partir de este entendimiento previo son generadas ideas de solución que van siendo depuradas y refinadas a conceptos, los cuales son evaluados y refinados hasta obtener conceptos adecuados desde lo técnico, el usuario y el negocio.

La ideación (síntesis) es el escenario por excelencia del complemento de TRIZ y DT, al combinar el enfoque de “juego” de DT sus herramientas intuitivas como Braisntorming, co-creación y prototipación, con las herramientas heurísticas de la TRIZ como los 40 principios inventivos, métodos de separación, efectos científicos entre otros, que proporcionan motivación, combinación de habilidades y conocimientos del equipo y dirección de la solución. Por ultimo en la fase de evaluación DT con su enfoque de visualización y evaluación con el usuario y TRIZ con sus principios de idealidad, evolución tecnológica y recursos del problema, proporcionan herramientas y complemento, para productos con alto grado de innovación donde se tienen incertidumbres tecnológicas y de mercado.

Cabe señalar que el modelo de integración de TRI y DT en el FFE presentado parte de una reflexión y es aún una propuesta conceptual, los pasos siguientes de detallado y validación de esta integración, permitirán obtener un modelo de FFE con las metodologías TRIZ y DT inseridas. Una dificultad identificada en la aplicación de TRIZ es el largo tiempo y la formación necesaria para utilizarlo [15], [39]. En este contexto, otra línea argumental para complementar el TRIZ y el DT es la tratada por Hentschel & Czinki [39] quienes indican que, a través del DT, una empresa puede entender las ventajas de la innovación sistemática, siendo fácil de implementar y puede, en caso de problemas que requieran un mayor nivel de abstracción, comenzar a utilizar el TRIZ; por lo tanto, el DT puede constituir un punto de entrada al TRIZ.

6. CONCLUSIONES

Fue discutido el FFE y contrastadas las metodologías TRIZ y DT, sin entrar en detalles de las herramientas que no es el foco de presente capítulo. Donde pudo establecerse como el enfoque técnico, racional y heurístico de la TRIZ, y el enfoque al usuario, intuitivo de DT ofrecen un complemento en el contexto de FFE, específicamente para productos con alto grado de innovación. Proporcionando herramientas para disminuir las incertidumbres propias de este tipo de innovaciones.

Fue analizado el FFE indicando como las problemáticas en el Inicial FFE pasan de generar y seleccionar ideas en los desarrollos incrementales, para de explorar el entorno técnico y Usuario/Mercado y generar y estructurar ideas de nuevos productos en el desarrollo de productos con alto grado de innovación. La combinación de TRIZ y DT permite facilitar esta exploración a partir de las herramientas y principio de ambas metodologías, y pasar de esta exploración a la determinación de oportunidades e ideas con foco en el negocio.

Ya en el Avanzado FFE la problemática paso de generar soluciones para generar evaluar y refinar ideas y conceptos teniendo en cuenta tanto la tecnología como el usuario y el negocio. Para plantear soluciones es necesario entender el problema desde la tecnología y los diferentes involucrados, la convergencia de las dos metodologías en ciclos de entendimiento, generación y estructuración - selección (análisis, síntesis y evaluación), facilita esta fase y potencia el desarrollo de conceptos con amplitud tecnológica y foco en el usuario.

Así las metodologías TRIZ e DT, para productos con alto grado de innovación ofrecen un complemento procurando mantener los dos direccionadores Tecnología y Usuario/Mercado a lo largo del FFE. Diferentes autores han propuesto complementos de DT o un enfoque de DCU con la TRIZ, utilizando la TRIZ para la generación de ideas a partir del entendimiento del problema con foco en el usuario, mejorando de esta forma los puntos débiles de cada metodología. En el presente trabajo se identificó como las dos metodologías se pueden complementar en los ciclos de análisis, síntesis y evaluación del Inicial y Avanzado FFE, para de esta forma reforzar tanto los puntos débiles como los puntos fuertes de TRIZ y DT.

Futuros trabajos van en la dirección de detallar la propuesta de FFE en el contexto de alto grado de innovación definir herramientas de TRIZ y DT, al igual que flujos de procesos, recordando que unas de las dificultades identificadas con las metodologías es la falta de consenso en el proceso general y la dificultad de identificar la herramienta adecuada al contexto real.

REFERENCIAS

- [1] M. V. Tatikonda y S. R. Rosenthal, «Successful execution of product development projects: Balancing firmness and flexibility in the innovation process», *Journal of Operations Management*, pp. 331–340, 2000.
- [2] P. Koen, G. Ajamian, R. Burkart, C. Allen, J. Davidson, R. D'Amore, C. Elkins, K. Herald, K. Herald, M. Incorvia, A. Johnson, R. Karol, R. Seibert, A. Slavejtkov y K. Wagner, "Providing Clarity and a Common Language to the "Fuzzy Front End," *Research Technology Management*, pp. 46- 55, 2001.
- [3] S. K. Markham, «The Impact of Front-End Innovation Activities on Product Performance», *Journal of Product Innovation Management*, p. 77–92, 2013.
- [4] R. G. Cooper, «Predevelopment Activities Determine Product Success», *Industrial Marketing Management*, pp. 237-247, 1988.
- [5] A. Khurana y S. R. Rosenthal, «Integrating the Process of Product Development Initiation: Transitions to a More Manageable 'Fuzzy Front End'», *Sloan Management Review*, 1997.
- [6] S. E. Reid y U. Brentani, «The Fuzzy Front End of New Product Development for Discontinuous Innovations: A Theoretical Model», *Journal of Product Innovation Management*, pp. 170-184, 2004.
- [7] A. Riel, M. Neumann y S. Tichkiewitch, «Structuring the early fuzzy front-end to manage ideation for new product», *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, pp. 107-110, 2013.
- [8] J. Frishammar, E. Dahlskog, C. Krumlinde y K. Yazgan, «The Front End of Radical Innovation: A Case Study of Idea and Concept Development at Prime Group», *Creativity and innovation management*, pp. 179-198, 2016.
- [9] J. Frishammar, U. Lichtenthaler y A. Richtner, «Managing process development: key issues and dimensions in the front end», *R&D Management*, pp. 213- 226, 2013.
- [10] M. A. B. Costa y J. C. C. Toledo, «Análise dos modelos e atividades do pré-desenvolvimento: revisão bibliográfica sistemática», *Gestão & Produção*, pp. 704-717, 2016.
- [11] M. Salerno, y L. A. Gomes, *Gestão da inovação mais radical*, São Paulo: Elsevier, 2018.
- [12] R. Leifer, G. C. O'Connor y M. Rice, «A implementação de inovação radical em empresas maduras», *Revista de Administração de Empresas*, pp. 17-30, 2002.
- [13] D. G. Reinertsen y P. G. Smith, «The Strategist's Role in Shortening Product Development», *The Journal of Business Strategy*, pp. 18-22, 1991.
- [14] G. S. Altshuler, *The innovation algorithm, TRIZ systematical innovation and technical creativity*, segunda ed., Worcester, MA USA: Technical innovation center INC, 2007.
- [15] M. Ilevbaren, D. Probert y R. Haal, «A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice», *Technovation*, vol. 33, p. 30–37, 2013.
- [16] G. Cascini, «TRIZ-based Anticipatory Design of Future Products and Processes», *Journal of Integrated Design and Process Science*, pp. 29-63, 2012.
- [17] S. D. Savransky, *Engineering of creativity, Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving*, Boca Raton, USA: CRC Press, 2001.
- [18] Terninko, A. Zusman y B. Zlotin, *Systematic innovation and introduction to TRIZ theory of inventive problem solving*, United States: CRC Press LLC, 1998.
- [19] U. Johansson-Sköldberg, J. Woodilla y M. Çetinkaya, «Design Thinking: Past, Present and Possible Futures», *Creativity and Innovation Management*, pp. 121-146, 2013.
- [20] P. Kimbell, «Rethinking Design Thinking: Part I», *Design and Culture*, pp. 285-306, 2011.
- [21] D. Rosa, *Caracterização do Design Thinking Visando - sua Integração com o Processo de Desenvolvimento de Sistema Produto- Serviço*, São Carlos: Dissertação de mestrado Universidade de São Paulo, 2017.
- [22] D. Dantas, *Design orientado para o futuro, centrado no indivíduo e na análise de tendências*, São Paulo: Tese doctoral Universidade de São Paulo, 2005.
- [23] R. Vizioli, y P. C. Kaminski, «Evolução do "design thinking" e suas ferramentas», *Conem*, 2014.
- [24] T. Brown, «Design Thinking», *Harvard Business Review*, pp. 1-10, 2008.
- [25] T. Brown y J. Wyatt, «Design Thinking for social innovation», *Stanford Social Innovation Review*, pp. 1-7, 2010.
- [26] Hassi y M. Laakso, «Design Thinking in the Management Discourse: Defining the Elements of the Concept», *18th International Product Development Management Conference*, pp. 1-14, 2011.
- [27] H. A. Simon, *The sciences of the artificial*, London England: The MIT Press, 1996.
- [28] D. A. Schon, *The Reflective Practitioner*, USA: Basic Books, 1983.
- [29] B. Lawson, *How Designers Think*, Oxford: Architectural Press, 2005.
- [30] Cross, *Designing Ways of Knowing*, Germany: Springer-Verlag, 2006.
- [31] R. Buchanan, «Wicked Problems in Design Thinking», *Design Issues*, pp. 5-21, 1992.
- [32] K. Krippendorff, *The Semantic Turn a New Foundation for Design*, Boca Raton, FL USA: Taylor & Francis Group, 2006.
- [33] D. Dunne y R. Martin, «Design Thinking and How It Will Change Management Education: An Interview and Discussion», *Academy of Management Learning & Education*, p. 512–523, 2006.
- [34] Institute of Design at Stanford, «Mini guía: una introducción al Design Thinking», 2010.
- [35] A. L. Fleury, H. Stabile y M. Carvalho, «An Overview of the Literature on Design Thinking: Trends and Contributions», *International journal of engineering education*, pp. 1704-1718, 2016.
- [36] IDEO, *Human Center Design Toolkit 2 edition*, 2011.
- [37] Stanford University, *ME310 Global New Product Design Innovation*, Paloalto California, 2012.
- [38] L. Carlgren, I. Rauth y M. Elmquist, «Framing Design Thinking: The Concept in Idea and Enactment», *Creativity and Innovation Management*, pp. 38-57, 2016.
- [39] C. Hentschel e A. Czinki, "Design Thinking as a door-opener for TRIZ-Paving the way towards systematic innovation-", *TRIZ Future 2013*, pp. 1-11, 2013.
- [40] A. V. Pelt y J. Hey, «Using TRIZ and human-centered design for consumer product development», *Procedia Engineering*, pp. 688-693, 2011.

- [41] S. Gurtner y R. Reinhardt, «Ambidextrous Idea Generation—Antecedents and Outcomes», *Journal Product Innovation Management*, pp. 34-54, 2016.
- [42] D. Akay, A. Demiray e M. Kurt, “Collaborative tool for solving human factors problems in the manufacturing environment: The Theory of Inventive Problem Solving Technique (TRIZ) method.,” *International Journal of Production Research*, pp. 2913-2925, 2008.

DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA (Cuarta Edición)

El contenido de este texto se encuentra conformado por una serie de capítulos en los que sus autores presentan el resultado de sus procesos de investigación en diferentes disciplinas ingenieriles. El libro acopia el trabajo de ingenieros, profesores e investigadores motivados en investigar temáticas de ingeniería, pero, sobre todo, con el espíritu de aportar al cuerpo de conocimiento y al desarrollo de esta área de conocimiento. Esperamos que los lectores encuentren la información y los datos necesarios para su formación, al mismo tiempo que para motivarlos a darles continuidad o validar los resultados que les ofrece el contenido.

ISBN: 978-958-52333-0-0

