

Prof. Edgar Serna M. (Ed.)

# INVESTIGACIÓN FORMATIVA EN INGENIERÍA

Segunda Edición



**Editorial IAI**  
Medellín - Antioquia  
2018

Prof. **Edgar Serna M.** (Ed.)

# Investigación Formativa en Ingeniería

Segunda Edición

ISBN: 978-958-56686-0-7

© 2018 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación



Serna, M.E. (Ed.)  
Investigación Formativa en Ingeniería -- 2a Edición  
Medellín, Antioquia  
Editorial Instituto Antioqueño de Investigación, 2018  
pp. 281. Investigación Científica  
ISBN: 978-958-56686-0-7

Investigación Formativa en Ingeniería  
Serie: Procesos Formativos  
© Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Segunda Edición: septiembre 2018  
ISBN: 978-958-56686-0-7  
Publicación electrónica gratuita

Copyright © 2018 Instituto Antioqueño de Investigación IAI™. Salvo que se indique lo contrario, el contenido de esta publicación está autorizado bajo [Creative Commons Licence CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Global Publisher: Instituto Antioqueño de Investigación IAI  
Cover Designer: 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 IAI  
Instituto Antioqueño de Investigación  
<http://fundacioniai.org>  
*contacto(AT)fundacioniai.org*

© 2018 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación  
Medellín, Antioquia

## Prólogo

Investigación Formativa en Ingeniería 3ra edición es un libro que surge en el trabajo de estudiantes, quienes presentan en cada capítulo un producto del proceso investigativo en semilleros y de su experiencia formativa y de investigación. En esta edición se cuenta con aportes desde las ingenierías Aeronáutica, Ambiental, Civil, Electrónica e Industrial; a la vez que de las Ciencias Computacionales y los Procesos Formativos en Ingeniería. Todos se conjugan en un texto que le permite al lector conocer el estado actual de estas disciplinas, como un aporte que hacen los estudiantes con el apoyo de tutores y compañeros de carrera.

Esperamos que este esfuerzo satisfaga a quienes consulten el libro, de la misma manera que lo ha sido para los comités técnicos y científico, el Editor general y la Editorial. Porque es una edición de amplio valor y de aporte para los procesos formativos de los ingenieros, especialmente para quienes buscan ideas para estructurar sus proyectos o para consultar documentos de avanzada y de actualidad.

Estamos seguros de que el contenido responde a las exigencias de la producción científica nacional e internacional, y el contenido refleja procesos estructurados de investigación y de trabajo colaborativo entre investigadores y estudiantes en formación. Por todo esto es un verdadero placer presentarle a la comunidad ingenieril, y otras relacionadas, un texto que, en sus páginas, materializa sueños y procesos serios, con los cuales sus autores quieren aportarle al cuerpo de conocimiento en cada área y disciplina que se relacionan en su contenido.

## Contenido

Análisis estructural mediante elementos finitos del chasis del vehículo USB-ECO <i>Rafael M. Cerpa B., Laura E. Garzón U., Ana I. Montealegre Y. y Karen N. Pirazán V.</i>	7
Análisis térmico y construcción de un álabe estator de turbina <i>Diego Jaimes, Luisa Castillo, Rafael Cerpa, Jesús Blanco y Bibiana Chaparro</i>	16
Diseño y construcción de un banco de pruebas para un álabe estator de turbina <i>Bibiana Chaparro, Michael Sánchez, Andrés Ibarra, Luz Ibarra, Rafael Cerpa y Diego Jaimes</i>	29
Diseño preliminar de un banco de pruebas de rodaje y sistemas de frenos de aeronaves categoría FAR 23 <i>Fabio Merchán, Adrián Torres y Eric Rodríguez</i>	42
Análisis estructural del ala de una aeronave categoría normal sometida a sus cargas críticas de diseño según normativa FAR 23 <i>Iván J. Sánchez S., Fabio A. Merchán R. y Carlos A. Hernández R.</i>	56
Formulación de una metodología para la Restauración Ecológica en ríos afectados por la minería de carbón. Caso de estudio río Lili, Cali. <i>Miller Cano A., Jhoan Popo V. y Javier E. Holguín G.</i>	68
Sistema de logística verde para la recolección de residuos sólidos en el sector centro sur de Bogotá <i>Juliet N. Ramos G.</i>	76
Análisis de las propiedades del PET usando mezclas de almidón de yuca y quitina extraída de las escamas de tilapia negra del Huila <i>María F. Manchola, Francisco Bernal y Hans Castro</i>	85
Análisis de la viabilidad técnica para la recuperación de estruvita e hidroxipatita a partir del agua residual generada en campus universitarios: Caso de estudio Universidad Autónoma de Occidente <i>Nancy Vásquez S., Diego A. Larrahondo C. y Hernán D. Mazuera R.</i>	94
Análisis de la calidad del recurso hídrico superficial de la microcuenca del río El Palmar (municipio de Ubaque, Cundinamarca) y exploración de la sostenibilidad ambiental de las otras microcuencas de Cundinamarca <i>Kimberly González B., Diana C. Santamaria S. y Gilberto Vallejo M.</i>	102
Implementación de un modelamiento para la asignación adecuada de aulas mediante la gestión de servicios para profesores y alumnos de las universidades a nivel nacional <i>Sebastián Rivera M., Kevin A. Pérez R., Mario A. Giraldo L., Ángel E. Ramos C. y Francia I. Caraballo M.</i>	111
Caracterización de las dificultades en el aprendizaje del Álgebra y técnicas de gamificación para el Diseño de un Sistema Tutorial Inteligente <i>David Montoya P. y Sandra P. Mateus S.</i>	120
Protocolos de prueba para drone-ambulancia: Caso UMNG <i>Daniela Ruiz, Juan Diego Orti y Leonardo J. Ramírez L.</i>	130
Prototipo de una plataforma tecnológica de soporte de una red social en una comunidad académica: Caso de estudio Politécnico Grancolombiano <i>Camila A. Gutiérrez L., David H. Macías V. y Javier F. Niño V.</i>	137
Gestión de riesgos en el desarrollo de proyectos de obras civiles para redes de fibra óptica <i>Karen S. Sierra G., Oscar A. Fajardo C. y Ricardo Ceballos G.</i>	144
Análisis de un elemento estructural de concreto como losa o viga sometida a cargas dinámicas utilizando el modelo de daño plástico mediante elementos finitos <i>Carlos J. Slebi A. y Tania J. Victoria R.</i>	151
Uso de cáscara de huevo como reemplazo parcial de material cementante en cubos mortero de cemento hidráulico <i>Francisco Gómez, Steven Frías, Viandy Bravo y Carlos Pacheco</i>	157
Control de temperatura en un invernadero solar para secado de café <i>Jaime O. Ruiz y Hugo Ruiz P.</i>	164
Inclusión de las energías renovables en el currículo de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Quindío <i>Jorge A. Aldana G., Alexander Vera T., César A. Álvarez G., Wilmer D. Jiménez T. y Alejandro Herrera U.</i>	170
Diseño y construcción de un interruptor con Wifi para control y monitoreo doméstico (Internet de las cosas) <i>Alben Melo, Wilder Pardo y Katherine Urrego</i>	182
Diseño y construcción de un prototipo de prótesis mioeléctrica de antebrazo y mano con dos grados de libertad <i>Javier R. Patiño R., Yordin C. Acevedo C. y Daniel H. Albarracín S.</i>	189
Caracterización de los músculos que permitan la mejor adquisición de señales mioeléctricas producidas por los movimientos del hombro <i>Daniel Albarracín S., Emilsen Y. Arias C. y Zaira López S.</i>	195
Indicadores de gestión ambiental basados en la Norma ISO 14031 Versión 2016, sector salud en Colombia <i>Tatiana A. Castañeda, Jolly V. Rivero y Jonathan D. Morales</i>	205
Herramientas de ingeniería aplicadas en el proceso de compostaje y vermicompostaje. Caso de estudio: Universidad Militar Nueva Granada <i>David F. Cárdenas M., Camilo A. Quiroga C. y Nataly L. Guarín C.</i>	217
Propuesta de un modelo Lean Seis Sigma para el mejoramiento del proceso productivo de la Industria Licorera del Cauca <i>Javier G. Melo A., Owen Alvares Z., Nora F. Arciniegas y Jaime H. Mendoza</i>	226
Mejoramiento del proceso de abastecimiento mediante Kraljic y Analytic Hierarchy Process - AHP en una empresa del sector textil <i>Daniel Valencia P., Carlos Cardona V. y Karla C. Álvarez U.</i>	235
Semillero de investigación Sindatronic – Un proceso formativo de desarrollo tecnológico en la Universidad Mariana <i>Fabio C. Gómez M., Jorge A. Chamorro y Alexandra L. Acosta</i>	251

Semillero Steam: Una experiencia de articulación interdisciplinar entre la educación media y superior <i>Albenis Cortés y Diana Romero</i>	258
Procesos de formación académica en ciencia y tecnología aeroespacial. Experiencias de investigación en coherencia experimental con estudiantes de ingeniería en Colombia <i>Alejandro Urrego P., Daniela Ramírez, Sebastián Serrato y Fabio A. Rojas M.</i>	265
Robot operado con aplicación móvil ROCA: Prototipo de robot teledirigido <i>Jeimy R. Sosa G., Camila A. Gutiérrez L. y Giovanni A. Piedrahita S.</i>	272
Implementación de una estrategia para el tratamiento de residuos químicos peligrosos en primeros cursos de química de la Facultad de Ingeniería de Uniminuto – Etapa preliminar <i>Julio C. Rivera R., Juliana Toro A. y Diego G. Pulido O.</i>	279

# Análisis estructural mediante elementos finitos del chasis del vehículo USB-ECO

Rafael M. Cerpa B.<sup>1</sup>

Laura E. Garzón U.<sup>2</sup>

Ana I. Montealegre Y.<sup>3</sup>

Karen N. Pirazán V.<sup>4</sup>

Universidad de San Buenaventura

Bogotá – Colombia

El proceso de construcción de cualquier diseño requiere elementos de verificación y simulación que permitan conocer el comportamiento de cada uno de los componentes antes de realizar su fabricación. A partir de este concepto se desarrolla el proceso de manufactura del vehículo urbano USB-ECO [8], basado en los resultados de los proyectos de investigación: *“Análisis aerodinámico de un vehículo urbano mediante dinámica de fluidos computacionales aplicado a la competencia de Shell Eco Maratón”*, *“Diseño del chasis para un vehículo categoría concepto urbano, aplicado a la competencia Shell Eco Maratón”*, *“Diseño y selección del sistema de propulsión para un vehículo urbano aplicado a la competencia Eco Shell Maratón”* y *“protocolo de manufactura de moldes y pieles del vehículo USB-ECO”*, de acuerdo con el plan estratégico en la línea de investigación de diseño de vehículos del grupo de investigación AeroTech de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá. La predicción del comportamiento de la estructura o chasis del vehículo se hace fundamental para el desarrollo de la construcción, ya que, en él, se ensamblan diferentes sistemas y debe garantizar la rigidez necesaria para soportar todos los esfuerzos presentados por cada uno de los componentes que constituyen la unidad. Una vez fabricado el chasis, se evalúa nuevamente su resistencia estructural mediante análisis por elementos finitos, con el fin de ajustar el diseño a las modificaciones realizadas por efectos del proceso de construcción. En los estudios se adicionaron elementos de sujeción para la carrocería que permiten tener en cuenta las cargas reales de los sistemas fabricados, validando la construcción y asegurando la resistencia total de la estructura.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio hace parte del proyecto de investigación titulado “Construcción de un vehículo concepto urbano aplicado a la competencia Shell Eco Marathon Fase I y Fase II” desarrollado por la Universidad de San Buenaventura Bogotá. El diseño del vehículo USB-ECO [2] realizado por parte del grupo de investigación AeroTech con el fin de participar dentro de la competencia Shell Eco Marathon [1] bajo el concepto urbano, fue evaluado con el fin de desarrollar los métodos de manufactura del mismo [8]; razón por la cual, su diseño inicial fue modificado dando alcance a la fabricación del prototipo acorde a los procesos básicos de manufactura, dentro de los cuales se tienen en cuenta uniones por soldadura y maquinado de piezas sencillas que logren satisfacer las necesidades operacionales del vehículo como prototipo tripulado y seguro.

Sin embargo, aunque el diseño del vehículo está basado en la reglamentación de la competencia el prototipo fue modificado en su fabricación para satisfacer otros fines operacionales. El grupo de investigación de la Universidad de San Buenaventura Aerotech plantea una renovada visión para el propósito del modelo, bajo la cual se implementa una planta motriz eléctrica y se cambia el concepto de cuatro llantas por un vehículo triciclo que conserva el mismo diseño aerodinámico propuesto inicialmente [2] para dar a conocer una nueva propuesta innovadora en la industria automotriz.

Para llevar a cabo la producción del vehículo, se requiere de procesos que permitan simular comportamientos reales, en este caso para garantizar la resistencia estructural del chasis se realizaron análisis computacionales que determinaron las deformaciones por flexión, validando que el material seleccionado en el diseño es lo suficientemente resistente frente a las cargas aplicadas. Con esta verificación del modelo y del chasis construido se realiza el proceso de manufactura del mismo, adecuando cada uno de los sistemas a los espacios dispuestos en el chasis que soporten el peso de los componentes y conserven la posición ergonómica del piloto.

Las principales modificaciones realizadas al chasis deben evaluarse para evitar comprometer la resistencia estructural del vehículo, de este modo, cada viga que se añada a la estructura debe ser justificada y simulada como parte de la unidad. Los cambios efectuados se realizaron únicamente para la integración de componentes como la planta motriz, carrocería (pieles y pisos del vehículo), llantas y sistemas afines instalados en la estructura. Adicionalmente, dichas modificaciones formaron parte de un análisis estructural y un proceso de construcción acorde a la manufactura anteriormente mencionada.

Finalmente, se reevalúa la distribución de masas (centro de gravedad) sobre el vehículo para mantener la estabilidad del nuevo concepto triciclo y se instalan los elementos necesarios para el funcionamiento de la planta motriz y un

---

<sup>1</sup> [ing.decano@usbog.edu.co](mailto:ing.decano@usbog.edu.co)

<sup>2</sup> [legarzonu@academia.usbbog.edu.co](mailto:legarzonu@academia.usbbog.edu.co)

<sup>3</sup> [amontealegre@academia.usbbog.edu.co](mailto:amontealegre@academia.usbbog.edu.co)

<sup>4</sup> [kpirazan@academia.usbbog.edu.co](mailto:kpirazan@academia.usbbog.edu.co)

sistema de emergencia contra fuegos para proteger la integridad de quien conduzca el vehículo durante las pruebas operacionales.

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El diseño novedoso de diferentes modelos automotrices está ligado con la necesidad de aumentar la eficiencia energética que impulsa al vehículo, bajo la cual se consideran aspectos de consumo de combustible y velocidad máxima. Shell es una compañía internacional de energía que propone estrategias investigativas para que estudiantes de todo el mundo desarrollen propuestas que aporten al progreso de soluciones energéticas limpias, dentro de ellas se encuentra la Shell Eco Marathon para impulsar el diseño, construcción y funcionamiento de vehículos tripulados y eficientes. La competencia exige ciertos requerimientos generales para la evaluación objetiva de cada modelo, esta reglamentación se presenta considerando todas las probables fases de desarrollo del vehículo. La Tabla 1 evidencia algunas de las principales reglas a tener en cuenta [1] [3].

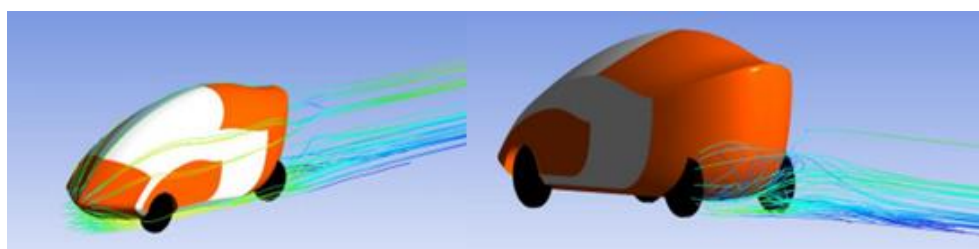
**Tabla 1.** Reglamentación general aplicable a la competencia

Concepto	Descripción
<b>Diseño del vehículo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diseño máximo de cuatro ruedas.</li> <li>▪ Carrocería con forma sensible al comportamiento del viento.</li> <li>▪ Radio de curvatura de esquinas: 0.05 m o mayor.</li> <li>▪ Requerimientos de seguridad y cargas estáticas máximas para la estructura del chasis.</li> </ul>
<b>Sistema de propulsión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aislar motores y fuentes de energía del conductor.</li> </ul>
<b>Dimensiones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Altura: 1-1.3 m</li> <li>▪ Ancho: 1.20-1.30 m</li> <li>▪ Longitud: 2.20-3.50 m</li> <li>▪ Distancia al suelo mínima: 0.10 m</li> <li>▪ Peso máximo: 205 Kg</li> </ul>
<b>Cuerpo del vehículo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La carrocería debe cubrir todas las partes mecánicas.</li> <li>▪ Acceso fácil para el conductor.</li> </ul>
<b>Llantas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diámetro de las ruedas: 0.3302-0.4318 m</li> <li>▪ Radio de giro mínimo de 6 m a 90°.</li> </ul>
<b>Vestuario, comodidad y visibilidad del conductor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cualquier condición que garantice la seguridad del conductor en situaciones de emergencia.</li> </ul>

El diseño del vehículo USB-ECO fue dividido para su desarrollo en tres pilares fundamentales, que al ser integrados determinan el completo funcionamiento y operación en la competencia: el diseño aerodinámico, el diseño del chasis y la planta motriz necesaria para generar la potencia que moverá al automóvil [2].

### 2.1 Diseño del vehículo

La resistencia al avance de un vehículo está limitada a la forma aerodinámica de la carrocería, este valor actúa como un parámetro fundamental para evidenciar y optimizar el comportamiento de consumo de potencia, pues a mayor resistencia mayor consumo, en consecuencia, el primer análisis a efectuar se basa en la aerodinámica del vehículo. En el proyecto de investigación *“Análisis aerodinámico de un vehículo urbano mediante dinámica de fluidos computacionales aplicado a la competencia de Shell Eco Maratón”*, nace la propuesta de crear perfiles en 2D aplicables a vehículos tripulados que guarden las dimensiones y requerimientos establecidos en la competencia. Se presentan cinco modelos y son analizados bajo condiciones de flujo dinámico, de acuerdo con los resultados es posible hacer un análisis comparativo con el fin de seleccionar la propuesta con el menor coeficiente de arrastre (Figura 1).



**Figura 1.** Diseño final del vehículo USB-ECO [4]

De las cinco propuestas se selecciona un modelo, destacado por un coeficiente de arrastre de 0.20291, dicho modelo es diseñado en tres dimensiones con el fin de comparar los resultados obtenidos en pruebas iniciales, obteniendo resultados corregidos y confiables que demuestren el comportamiento del viento sobre todas las secciones del diseño preliminar. Las modificaciones adaptadas son aplicadas en la parte delantera para disminuir la zona de alta presión, en la curvatura de la sección posterior para reducir el desprendimiento de la capa límite y el aumento del diámetro de las llantas [4].

Las pruebas son desarrolladas teniendo en cuenta diversos casos de tipos de malla y modelos de turbulencia aplicables, que bajo el capítulo II del libro *“Diseño de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible”* son validados mediante pruebas experimentales del modelo a escala en el túnel de viento [2]. Finalmente, con los cambios realizados se disminuye la fuerza de arrastre y por ende la potencia requerida estableciendo así el diseño final de la carrocería del vehículo.



## 2.2 Diseño del chasis

El chasis es la estructura base para la construcción de un vehículo, cada uno de los componentes y sistemas deben estar soportados sobre el mismo y los materiales de fabricación deben garantizar la resistencia estructural suficiente para cada condición de operación que pueda presentarse, adicionalmente, el diseño definido debe conservar la seguridad de quien lo opere y cumplir con las normas de la competencia.

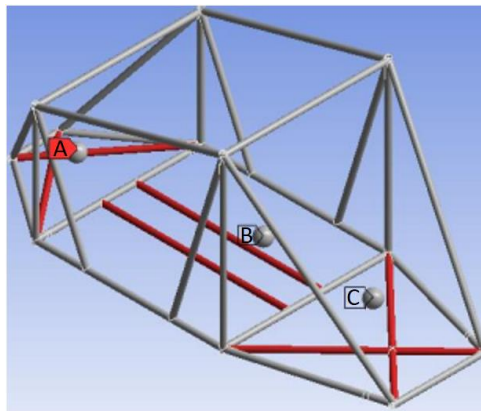
El proceso de diseño del chasis desarrollado en el proyecto de investigación titulado “*Diseño del chasis para un vehículo categoría concepto urbano, aplicado a la competencia Shell Eco Marathon*”, plantea tres objetivos, cumplir con la reglamentación de la competencia, guardar la distribución mecánica de los componentes y determinar el tipo de material para la fabricación de la estructura. Partiendo de estos principios, se realizan análisis estructurales para diferentes propuestas bajo cargas estáticas dispuestas por Shell considerando en todos los casos Acero A36 y Aluminio 6061 T6 (Tabla 2) como posibles materiales de fabricación [3].

**Tabla 2.** Propiedades de posibles materiales propuestos para la construcción del chasis

Material	Acero A36	Aluminio 6061 T6
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	7800	2710
Tenacidad [MPa]	470-550	260
Coefficiente de Poisson	0.3	0.33
Soldabilidad	Alta	Alta
Máxima ángulo de dobléz	76°	>90°
Factor de rigidez [MPa]	77000	26000
Módulo de elasticidad [MPa]	200000	68900
Elongación	14%	15%
Costo [COP/m <sup>2</sup> ]	5300	30100

Se especifican procesos de fabricación del chasis acorde con los tipos de material propuestos y se destacan las principales ventajas de cada uno de ellos frente aspectos de resistencia estructural, precio, disponibilidad y cumplimiento de funciones principales además de posibles afectaciones al medio ambiente. Para determinar el diseño final del chasis se realiza un análisis por elementos finitos para cargas estáticas mediante ANSYS APDL, con el fin de comparar cada uno de los modelos propuestos en los dos materiales definidos.

A partir de las simulaciones se selecciona el Aluminio 6061 T6 como material de fabricación, debido a su relación peso-resistencia y a la contribución del mejor rendimiento del vehículo. Con el diseño preliminar se verifican aspectos de comportamiento en reposo, aceleración, frenado, giro y volcamiento a través de simulaciones 3 dimensiones que garantizaron evaluar un total cumplimiento de las funciones del chasis (Figura 2). Adicionalmente, se proponen métodos para la unión por soldadura de la estructura del vehículo [3].



**Figura 2.** Diseño final del chasis seleccionado y posicionamiento de cada una de las cargas estáticas por secciones principales del vehículo (A) Delantera, (B) Central y (C) Trasera

## 2.3 Requerimientos de planta motriz y sistemas

El motor del vehículo debe ser capaz de mover el peso máximo establecido en los requerimientos de la competencia [3] con el mínimo gasto energético, con el fin de demostrar el mayor rendimiento del vehículo con el menor consumo de energía [1] y dar a conocer una propuesta bajo el concepto de sostenibilidad en el transporte urbano. Este sistema debe estar completamente sujeto al chasis para evitar una desintegración del vehículo y posibles accidentes.

Dentro del marco de desarrollo del vehículo se plantea el proyecto de investigación para el “*Diseño y selección del sistema de propulsión para un vehículo urbano aplicado a la competencia Eco Shell Marathon*”, planteado inicialmente como un sistema híbrido bajo el cual se definen los componentes principales y necesarios para construir un sistema funcional. Se realiza una caracterización de cada componente y se establece su máxima capacidad de operación para llegar a acabo un prototipo funcional que demuestre el comportamiento del motor [5]. Cada componente responde a las características calculadas en las estimaciones iniciales de peso para determinar el torque y la potencia requerida

del motor, y finalmente se lleva a cabo una selección de la totalidad de las partes del sistema, estimando un peso total de la planta motriz de 33 kilogramos. [5] [6]

Finalmente, basados en los principales proyectos de investigación se desarrollan propuestas para construir los sistemas complementarios: sistema de dirección, frenado, anti fuego, eléctrico, conjunto de llantas y ergonomía del piloto. Cada uno de los anteriores se adaptan a la geometría del chasis y carrocería del vehículo previamente diseñados, con la limitante de realizar diseños computacionales sin tener en cuenta procesos de fabricación que, en consecuencia, generan inconvenientes a la hora de fabricar las piezas esenciales de cada sistema. Estos conjuntos de componentes adicionales permiten al vehículo cumplir con las funciones principales y deben ser acordes al tamaño y complejidad de este.

### **3. CONSTRUCCIÓN DEL VEHÍCULO USB-ECO**

Dentro de proceso de construcción de cualquier producto se debe considerar cada una de las fases de fabricación, todo diseño debe ser posible y coherentemente limitado por las prácticas de manufactura. En este caso, por ser un proyecto de investigación formativa, la fabricación no debe estar sujeta un proceso certificado que garantice una producción masiva de elementos, sin embargo, debe regirse bajo indicadores de diseño y las modificaciones deben ser evaluadas antes de implementarlas.

La fabricación del vehículo se basa en métodos de manufactura utilizados en el mercado, teniendo en cuenta costos y posibilidades de desarrollo en las instalaciones de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá. Inicialmente se construye la carrocería o carenado del vehículo, cumpliendo con las características del diseño, se crean moldes y se selecciona el material. En este caso, luego de un estudio de materiales se establece la fibra de vidrio como material para las pieles debido a su alta resistencia mecánica, resistencia a la corrosión química y bajo peso como se señala en el *“protocolo de manufactura de moldes y pieles del vehículo USB-ECO”*. [7]

Con el componente externo desarrollado se fabrica la estructura principal del vehículo, el chasis tubular se construye con perfiles redondos de una pulgada de diámetro en Aluminio 6061 T6, soldados entre sí, que mantienen el diseño base. Para contrarrestar las vibraciones que pueden generarse como resultado de la sujeción del chasis a la carrocería, se realiza un tipo de armadura interna que conserva la forma del diseño aerodinámico del vehículo y soporta las pieles para obtener una carrocería rígida y compacta. [8]

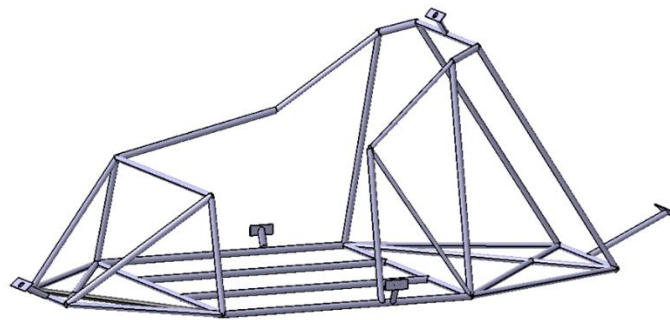
Una vez se consolida la fabricación de los dos principales componentes estructurales se establecen las modificaciones necesarias para la integración de los sistemas y componentes adicionales adquiridos al vehículo; es importante resaltar que en el diseño inicial no se tenía información exacta de las dimensiones y peso de cada uno de los componentes y sistemas, razón por la cual, en el momento de la integración a la estructura, se debieron realizar cambios en el diseño de la misma. Inicialmente, se evaluó la posibilidad de instalar un motor eléctrico en cambio del sistema híbrido, por cuestiones de costos, mantenimiento e instalación del mismo. Un sistema eléctrico puede adquirirse en el mercado como parte de un conjunto de elementos que deben ser adaptados al vehículo, en donde su funcionamiento está garantizado y no da lugar a un rediseño que pueda intervenir en el proceso de manufactura del USB-ECO.

Como parte de la modificación del tipo de planta motriz se establece un nuevo concepto para el vehículo, en donde se evalúa la posibilidad de modificar un sistema de cuatro llantas por un modelo triciclo. [9] Manteniendo el diseño externo de la carrocería y el chasis se calcula la estabilidad para un automóvil de tres llantas, en este análisis se tienen en cuenta conceptos de centro de gravedad y distribución de masas que van a estar enteramente relacionados con el estudio de la resistencia estructural del chasis.

El sistema de dirección y frenado fueron modificados, debido a que en el diseño inicial las piezas eran de gran complejidad para la fabricación; parte de estos sistemas fueron reemplazados por otros mucho más simples que cumplieran con las mismas funciones establecidas para la operación del vehículo. Todas las partes de la construcción de sistemas son esquematizadas, con el fin de facilitar futuros procesos de desmonte y reparación de piezas. De la misma manera que en el caso anterior, de la planta motriz, se afectó la estructura interna del vehículo, estos sistemas soportados en el chasis deben ser integrados de alguna manera para que puedan cumplir con su función y esto implica una modificación mayor en la estructura que debe ser analizada para verificar su rigidez. Teniendo en cuenta lo anteriormente enunciado, se procedió a realizar un nuevo estudio estructura aplicando software de elementos finitos, con el fin de validar la resistencia estructural del chasis con todos los componentes y sistemas instalados.

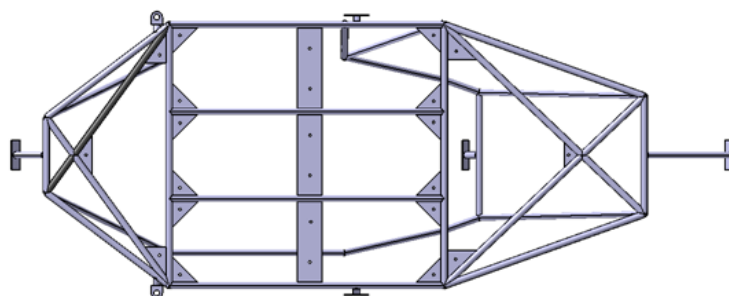
#### **3.1 Modificaciones estructurales**

Las modificaciones realizadas al chasis implican un grado crítico en toda la construcción del vehículo, cada viga agregada o eliminada de la unidad debe garantizar la resistencia estructural del vehículo. Los cambios realizados fueron específicamente en las sujeciones que permitirán acoplar la carrocería al chasis, en este caso se sueldan tubos inclinados que se adapten a la forma de la armadura y se sujeten con tornillos a placas que reciban todo el peso de la carrocería, manteniendo unidas todas las pieles del carenado. Existen cinco puntos claves para la sujeción de la carrocería, la sección delantera, trasera, superior y los laterales, ya que allí estarán localizados los tubos de soporte de la carrocería. (ver Figura 3).



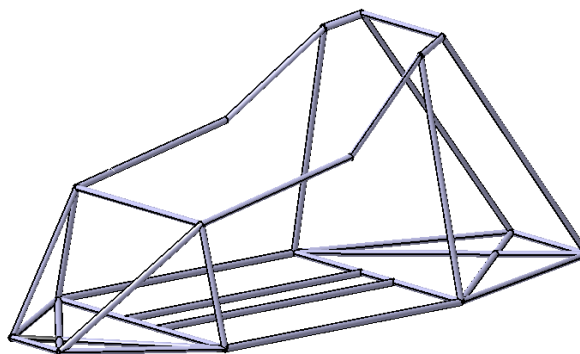
**Figura 3.** Diseño modificado del chasis para sujeción de la carrocería

La siguiente modificación está dispuesta para el soporte de los pisos del vehículo, en donde irán localizados algunos componentes de los sistemas y el conductor, es fundamental evaluar la resistencia de estos soportes que comprometen la seguridad de quien conduce y maniobra el automóvil. Como parte de la solución a este imprevisto se instalan placas en forma triangular y rectangular que ubicadas en lugares estratégicos mediante soldadura garantizan la instalación segura de los pisos (Figura 4).

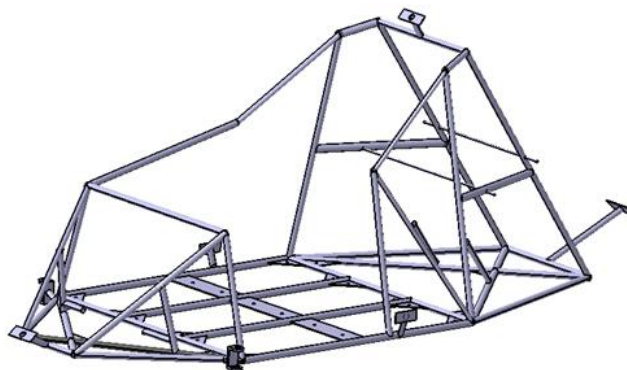


**Figura 4.** Diseño para la sujeción de pisos del vehículo

Finalmente, se realizan cambios en el chasis para la instalación de todo el conjunto de las ruedas, en donde se incluye el motor y los amortiguadores. Estos soportes deben ser analizados bajo las cargas reales de cada uno de los componentes y mediante análisis por elementos finitos se deben simular antes de ser construidos. Como parte adicional, se elimina una de las barras laterales para facilitar el acceso del piloto al vehículo y se desarrolla el diseño para el soporte de la silla que debe conservar la posición ergonómica del conductor (Figura 5).



Diseño y construcción inicial del chasis



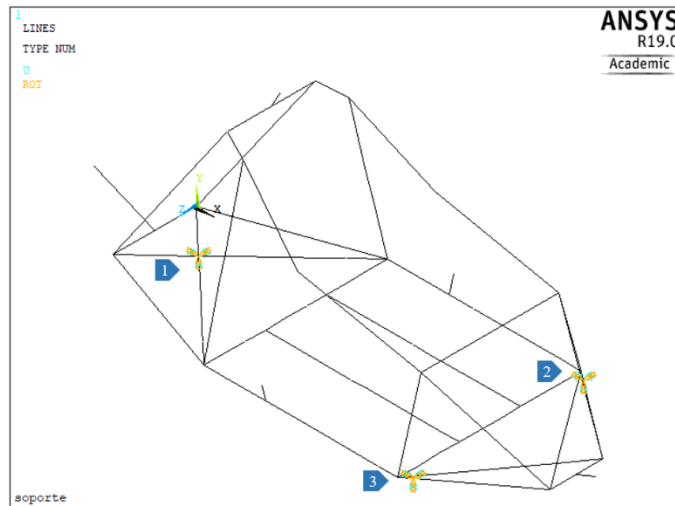
Diseño final del chasis

**Figura 5.** Modificaciones estructurales realizadas al chasis del vehículo USB-ECO para soporte e integración de la carrocería y sistemas

### 3.2 Análisis del nuevo modelo de chasis

Dentro de las pruebas estructurales para la propuesta del diseño se estimaron los esfuerzos para tres condiciones de operación críticas: frenado, aceleración y giro, aplicando las respectivas cargas sobre diferentes partes del chasis que pudiesen simular una respuesta de la estructura y el material seleccionado [3]. Sin embargo, para verificar el diseño construido no es necesario realizar pruebas dinámicas, puesto que las modificaciones están previstas para soportar cargas por flexión.

Cada una de las modificaciones debe ser evaluada en simulaciones de ANSYS APDL en análisis de carácter estático para evitar la consideración de efectos inerciales y centrarse exclusivamente en los efectos generados por el peso de la carrocería y componentes a instalar. El modelamiento del chasis en APDL es un *skeleton* básico que consta de líneas y puntos conectados entre sí que garantizan la distribución de cargas sobre todo el conjunto. Estas secciones se definen para ser representadas en 3 dimensiones y se establecen tres puntos de anclaje fijos donde se restringe el movimiento en todos los ejes, ubicados en cada una de las posiciones de las ruedas como se observa en la Figura 6.



**Figura 6.** *Skeleton* en APDL para el análisis por elementos finitos del chasis. (1) rueda trasera, (2) rueda delantera izquierda y (3) rueda delantera derecha

Los pesos aplicados sobre la estructura para el análisis se tomaron de los componentes reales, o se estimaron con otros físicamente similares. Todas las modificaciones se simularon de manera progresiva, es decir como una suma de acontecimientos en la que al final se obtienen todas las modificaciones en un único análisis de 9720 nodos. Para establecer las disposiciones de las cargas estáticas adjuntas en la Tabla 3, se orientan por la posición real de los componentes del carro como se observa en la Figura 7.

**Tabla 3.** Cargas estáticas aplicadas sobre el chasis para análisis por elementos finitos en ANSYS APDL

No.	Componente	Cargas en Y	Ubicación
1	Piel carrocería trasera	-23.9364	Barra trasera.
2	Piel carrocería superior	-21.6801	Barra ubicada en la parte más alta del chasis.
3	Piel carrocería derecha	-6.7689	Barra derecha.
4	Piel carrocería izquierda	-7.2594	Barra izquierda.
5	Piel carrocería frontal	-21.9744	Barra frontal sobre el nodo externo.
	Estructura de madera	-48.4614	Se divide la fuerza en los cinco puntos de sujeción.
6	Piso trasero	-19.62	Áreas triangulares traseras.
7	Piso central derecha	-20.0124	Áreas a la derecha del piloto.
7	Batería derecha	-104.4765	Área rectangular de la derecha.
8	Piso central	-21.1896	Áreas centrales.
8	Baterías traseras	-314.4105	Áreas posteriores en la parte central.
9	Piso central izquierda	-19.9143	Áreas a la izquierda del piloto.
9	Batería izquierda	-104.5746	Área rectangular de la izquierda.
10	Piso frontal	-19.62	Áreas triangulares delanteras.
11	Soporte de llanta trasera	-25.1136	Sobre la barra trasera instalada para la ubicación del conjunto del motor.
11	Motor	-163.0422	La misma ubicación que el soporte.
12	Amortiguador trasero	-13.9302	Sobre la barra delantera instalada para la ubicación del conjunto del motor.
13	Llanta delantera	-48.4614	Barras delanteras izquierda y derecha.
14	Peso promedio del piloto	-490.5	Distribuida sobre la sección de la barra cercana a la placa central.
14	Silla	-68.67	La misma ubicación del piloto.

Se emplearon secciones de tipo BEAM para las barras y SHELL para las placas, cada una de ellas con las características correspondientes de diámetro y espesor. Igualmente se insertaron las características mecánicas del Aluminio mencionadas previamente en la Tabla 2. En la Figura 8, se observa según la escala de colores la intensidad de la deformación, es decir, mientras más cercano al rojo se incrementa la deflexión del aluminio debido a los valores de las cargas efectuadas por cada componente. Los resultados son visualizados con un factor de escala de 28.61 calculado por el programa con el fin de diferenciar el cambio en la simulación.

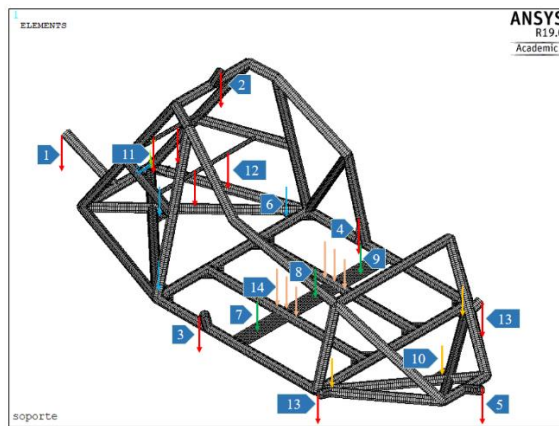


Figura 7. Disposición geométrica de las cargas aplicadas en APDL del chasis del vehículo USB-ECO

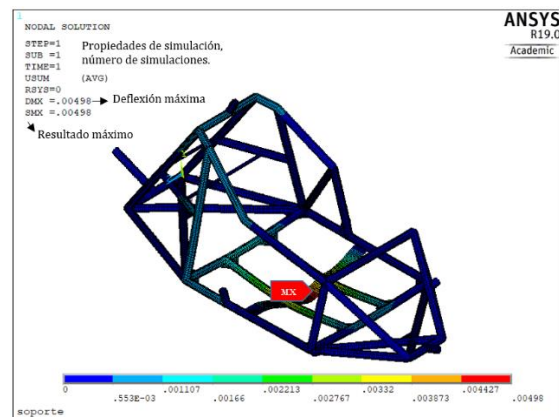


Figura 8. Resultados de la simulación del diseño modificado del chasis del vehículo USB-ECO

Los resultados indican que aún con los cambios realizados se conserva la resistencia estructural del vehículo, la deformación máxima se presenta sobre la placa central del chasis, en la ubicación del conductor y la silla. Sin embargo, la deflexión es de 4.98 milímetros, la cual es aceptable de acuerdo con el estado del arte en investigaciones similares. Las deformaciones más importantes son ocasionadas por las baterías pues es el componente con mayor peso en el vehículo; es importante aclarar que en el estudio no se consideró la resistencia que aporta el material de los pisos de fibra de carbono, adicionalmente, se aplicaron las cargas directamente sobre las placas como valores de presión y no se tuvo en cuenta la sección rectangular de la batería física.

Las deformaciones pueden ser comparadas con las condiciones iniciales de la geometría, como se muestra en la Figura 9, las líneas azules muestran la deformación escalada en cada parte del chasis en donde las vistas frontal y superior permiten determinar que barras y láminas están sometidas a las cargas con mayor magnitud. De este resultado se parte para definir las zonas críticas y la ubicación más adecuada si se desea incluir un componente adicional como parte de algún sistema.

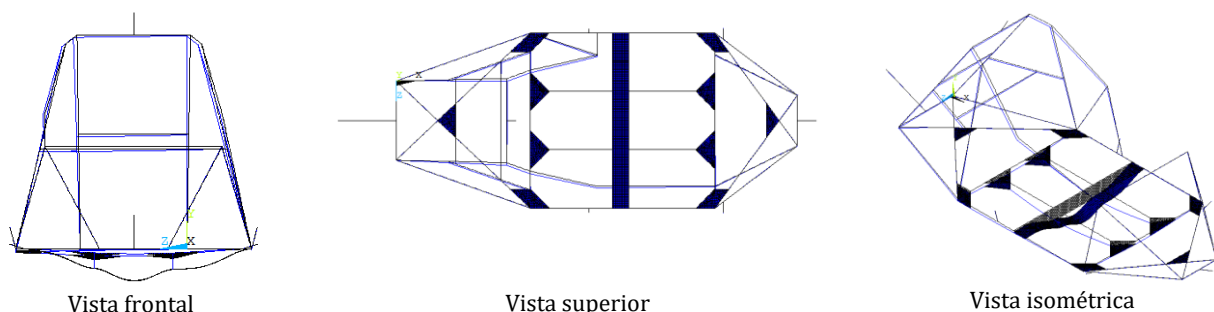


Figura 9. Comparación de la estructura deformada y la geometría inicial

Por ejemplo, cuando se realizó la simulación para las barras de sujeción de la carrocería, la barra con mayor deformación fue la trasera, con un valor máximo de 0.11 milímetros considerados insignificantes pero tenidos en cuenta para procesos de acabado superficial de la carrocería que pueden aumentar la carga y, por ende, la deformación de la barra. La verificación de este modelo en el módulo de ANSYS WORKBENCH no es necesaria, debido al tipo de análisis y las consideraciones tenidas en cuenta durante el análisis de APDL. Este método es práctico para estudiar casos estáticos en el que las estructuras son simples y se pueden idealizar, con el fin de optimizar tiempo en procesos de construcción. Dentro de los parámetros de manufactura del vehículo USB-ECO se consideraron las modificaciones simuladas y se tuvieron en cuenta los resultados para disminuir el peso de los componentes manufacturados como la silla y otros afines a los sistemas de dirección y frenado.

#### **4. CONCLUSIONES**

El diseño de un vehículo no solamente se limita en un diseño primario que indique las disposiciones físicas de cada componente, sino que, debe ser respaldado por una metodología de construcción la cual evite inconvenientes durante el proceso de manufactura. La previsión de este tipo de protocolos dentro del proyecto del vehículo USB-ECO permite una fabricación acorde a las ideas señaladas en el diseño detallado y evita retrasos por inconvenientes de verificación.

Por otra parte, la modificación de ciertos parámetros no implica un rediseño del vehículo, en este caso, los cambios son realizados con fines relacionados con la optimización de los procesos de manufactura que afectan directamente a la estructura del chasis y, por lo tanto, deben ser evaluados. Conservando, a su vez, el concepto inicial del vehículo urbano aplicando estrategias que mejoren el funcionamiento y aporten de manera positiva a la creación de nuevos modelos de automóviles.

Las simulaciones de cada modificación fueron evaluadas de manera individual teniendo en cuenta su impacto en el conjunto total del chasis, garantizando que dichos cambios no afectaran directamente la resistencia estructural de chasis, si no, por el contrario, mejorará las características del mismo. Comparando la deformación máxima en los resultados de la simulación y el porcentaje de elongación del Aluminio 6061 T6, se aprueba la implementación de todas las modificaciones al chasis como parte indispensable en el proceso de construcción, ya que sin ellas no sería posible la integración de todo el vehículo.

## REFERENCIAS

- [1] Shell Global (2016). [Energy and Innovation, Shell Eco – Marathon Americas](#). Online [May 2018]
- [2] Cerpa, R. et al. (2017). Diseño de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible. Universidad de San Buenaventura.
- [3] Forero, D. & Pinzón A. (2014). Diseño del chasis para un vehículo categoría concepto urbano, aplicado a la competencia Shell Eco Marathon. Trabajo de Grado. Universidad de San Buenaventura.
- [4] Barrera, J., Ramírez C. & Maldonado, D. (2014). Análisis aerodinámico de un vehículo urbano mediante dinámica de fluidos computacionales aplicado a la competencia de Shell Eco Marathon. Trabajo de Grado. Universidad de San Buenaventura.
- [5] Cortés, D. & Mustafá, S. (2014). Diseño y selección del sistema de propulsión para el vehículo urbano aplicado a la competencia Eco Shell Marathon. Trabajo de Grado. Universidad de San Buenaventura.
- [6] Cerpa, R. et al. (2015). Selección del sistema de propulsión de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible. *Ingenium* 17(33), 41-53.
- [7] Cerpa, R. et al. (2017). Protocolo de manufactura de moldes y pieles vehículo USB-ECO. Trabajo Académico. Universidad de San Buenaventura.
- [8] Cerpa, R., Porras, H. & Acosta, H. (2017). Proceso de manufactura de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible. En Congreso internacional de tecnología, Ingeniería e innovación. Bogotá, Colombia.
- [9] Garzón, L., Montealegre, A. & Pirazán, K. (2018). Construcción del vehículo urbano USB-ECO. Trabajo de Grado. Universidad de San Buenaventura.

# Análisis térmico y construcción de un álabe estator de turbina

Diego Jaimes<sup>1</sup>

Luisa Castillo<sup>2</sup>

Rafael Cerpa<sup>3</sup>

Jesús Blanco<sup>4</sup>

Bibiana Chaparro<sup>5</sup>

Universidad de San Buenaventura

Bogotá – Colombia

El siguiente estudio tiene como propósito diseñar, construir y analizar el comportamiento de un álabe estator de turbina sometido a ciertas condiciones de operación, con el fin de determinar la transferencia de calor a través del mismo. Para el diseño del álabe se tomó como guía la metodología expuesta en el libro de “Gas Turbine Theory” de Saravanamuttoo, que permite realizar los cálculos térmicos y de dinámica de gases del motor a reacción CFM-56. Luego de llevar a cabo el diseño del álabe, se llevaron a cabo los procesos de construcción y manufactura. Para esto se seleccionó el aluminio 6061 T6 teniendo en cuenta las capacidades de fabricación dispuestas en la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá. Como última parte de este estudio, se hicieron los análisis térmicos en el software ANSYS Workbench y ANSYS Fluent. Así mismo, se realizaron los cálculos teóricos de transferencia de calor del álabe, para evidenciar el comportamiento de este componente al ser sometido a un flujo de aire de alta temperatura.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las máquinas térmicas y más específicamente en motores de uso aeronáutico, es de vital importancia realizar diseños óptimos para las secciones internas de los turborreactores (compresor y turbina) con la finalidad de obtener un rendimiento elevado. Es por esta razón que uno de los objetivos de esta investigación fue realizar el diseño de un álabe estator de turbina. Este es un componente del cual se puede extraer cierta porción de energía para el funcionamiento del motor. Para el diseño, en primer lugar, se tuvo en cuenta que la geometría del álabe depende directamente de los triángulos de velocidades que forma el aire al pasar a través del componente, así como los ángulos de entrada y de salida del flujo que se quieren obtener. Estos triángulos de velocidades permiten conocer comportamientos específicos de la etapa estatora de turbina como lo es el grado de expansión y así poder determinar la dinámica de los gases al interior del turborreactor. Por otra parte, no solo son influyentes estos métodos para el diseño geométrico de los álabes de turbina para determinar el comportamiento del motor; sino que también, al ser una sección expuesta a elevadas cargas térmicas, es necesario determinar la velocidad de transferencia de calor a lo largo de los álabes, para estudiar los mejores métodos de refrigeración con el fin de lograr un aumento en la temperatura a la entrada de la turbina. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se hicieron los análisis térmicos y la construcción de un álabe estator de turbina.

El diseño del álabe de este proyecto parte de propiedades establecidas de un motor existente conocido como CFM-56, utilizado en aeronaves como el Airbus A320. Tomando como referencia este motor, se identificaron los parámetros de entrada con los cuales se desarrollaron los cálculos térmicos y de dinámica de gases a través del software GasTurb el cual permite modelar y determinar ciclos termodinámicos. Posteriormente, se obtuvieron los parámetros específicos de diseño del álabe (ángulos de entrada y salida del flujo, grados de expansión por etapa, entre otros). Siendo a partir de dichos resultados calculados que, se realizó el modelamiento geométrico del álabe, teniendo en cuenta que para su construcción fue escalado a un tamaño mayor con el fin de poder realizar un proceso de manufactura apropiado, teniendo a disposición métodos convencionales de fabricación. Es importante en este punto aclarar que este álabe fue probado en un banco de pruebas con el cual se obtuvieron los datos reales de la temperatura interna del álabe, sometido a un proceso de refrigeración y calentamiento por convección interna forzada y convección externa forzada, respectivamente.

A partir de la geometría del álabe y teniendo en cuenta que en condiciones reales de operación estará sometido a cargas térmicas, se hizo el análisis de transferencia de calor en el álabe por dos metodologías; la primera de ellas, asumiendo que el álabe estator funciona como una aleta en cantiléver y que está expuesta al flujo de aire caliente. De este análisis es importante especificar que no hay transferencia de calor forzada al interior del elemento, es decir, no tiene flujo de refrigeración. La segunda metodología, agrupa la parte de transferencia de calor por convección interna forzada, en donde se hace circular un fluido al interior de unos conductos para refrigerar el elemento y mejorar su capacidad de soportar cargas térmicas. Por último y como método de adicional, se realizó la simulación térmica del álabe en ANSYS Fluent, teniendo en cuenta condiciones de frontera y de flujo específicas, para finalmente a través de la interfaz gráfica, obtener el comportamiento térmico del álabe con sus orificios de refrigeración.

---

<sup>1</sup> dejames@academia.usbbog.edu.co

<sup>2</sup> lfcastillom@academia.usbbog.edu.co

<sup>3</sup> ing.decano@usbbog.edu.co

<sup>4</sup> jdblancog@academia.usbbog.edu.co

<sup>5</sup> brchaparro@academia.usbbog.edu.co



## 2. MÉTODO

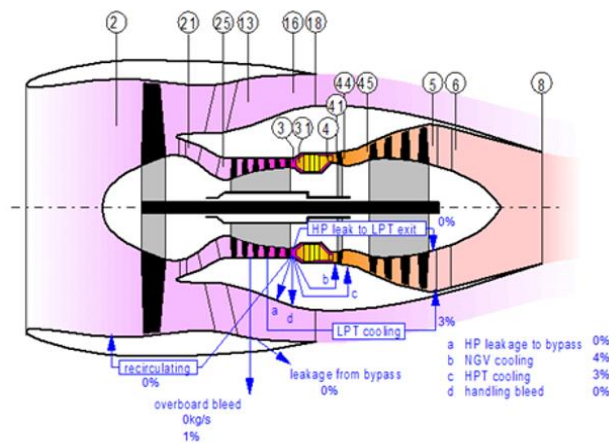
### 2.1 Modelamiento del perfil aerodinámico

El diseño de un álabe estator de turbina, parte del estudio térmico y de dinámica de gases del motor seleccionado; debido a que es necesario conocer parámetros operacionales del componente con el fin de obtener la geometría del mismo. De tal forma que fue necesario iniciar determinando los parámetros gasodinámicos del motor a reacción para establecer las condiciones a las cuales el fluido ingresa a la etapa. Es por esta razón que, para determinar dichas variables de modelamiento, se seleccionó el motor CFM-56 implementado en la aeronave A320 [1]. Aplicando el software GasTurb y teniendo en cuenta los parámetros de entrada mostrados en la Tabla 1, se elaboraron los cálculos respectivos para encontrar los valores de temperatura del motor y velocidades.

**Tabla 1.** Parámetros de Entrada [1]

Datos de entrada	Valor (unidades)
Relación de presión a la salida del Fan.	1.55
Relación de compresión HP Relación Bypass	26.5
Número de etapas de turbina de alta	1
HP Número de etapas de turbina de baja	4
Temperaturas atmosféricas: a nivel del mar	288 K
Flujo Másico	426 kg/seg
RPM LPC.	5000
RMP HPC.	14460

Es necesario asumir las velocidades rotacionales de la punta del álabe y la velocidad axial del flujo. En investigaciones previas, se ha demostrado que las velocidades rotacionales del álabe ( $U_t$ ) son de 350 m/s teniendo en cuenta los esfuerzos que se pueden presentar en el álabe. De igual manera, la velocidad axial del fluido se encuentra entre los valores de 150 a 200 m/s, de tal forma que para este análisis se establece una velocidad axial promedio de 175 m/s [2]. Utilizando la plataforma GasTurb se obtienen los resultados presentados en la Tabla 2. También, la Figura 1 muestra el diagrama de estaciones del motor con el fin de comprender las magnitudes mostradas en la tabla.



**Figura 1.** Estaciones del Motor (Fuente: GasTurb)

**Tabla 2.** Datos de la etapa de turbina de alta obtenidos de GasTurb

Datos de entrada	Valor (unidades)
ITT	1538 K
T03	1049 K
To1-To3	489 K
Po1	2808 KPa
Po3	473,401Kpa
Relación de presiones (Po1/Po3)	5,931546406
Cp gases	1,148
$\alpha_3$	15

Luego de obtener los datos térmicos y de dinámica de gases de todo el motor, se llevó a cabo el dimensionamiento del álabe implementando la relación raíz-punta para el álabe estator de turbina. Dicho esto, es importante señalar que el diseño del álabe estator se hizo únicamente para la sección de turbina de alta del motor CFM-56 y como esta especificado en la tabla 1, este tiene solo una etapa de turbina de alta. Entonces, primero fue necesario conocer el flujo másico primario el cual depende de la relación Bypass (B). Este se calculó por medio de la ecuación (1) [2].

$$m_h = \frac{m_t}{B+1} \quad (1)$$

$$m_h = 60.857 \text{ kg/s.}$$

La relación raíz-punta se encuentra entre los valores de 0.4 a 0.6 [2], dependiendo de la velocidad rotacional (rpm) a la que está sometido el álabe y el radio de la punta del álabe. De tal forma que, fue necesario realizar un proceso

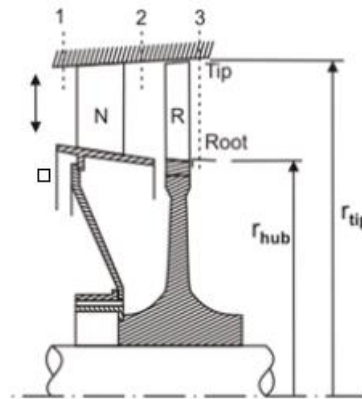
iterativo, haciendo una comparación entre los factores anteriormente mencionados y las revoluciones a las que opera el motor CFM-56, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Tabla de iteración relación raíz-punta.

Relación raíz-punta	Radio punta (rt) (m)	Velocidad rotacional (rev/s)
0,4	0,145437917	251,6919395
0,45	0,149262923	245,2420909
0,5	0,153917023	237,8265282
0,55	0,159604518	229,351598
0,6	0,166620065	219,6947361

Al convertir la velocidad rotacional de la turbina de alta en *rev/s* se obtiene un valor de 241 *rev/s*, que al ser comparado con los datos de la Tabla 3, el valor más cercano es de 237,8265 *rev/s*. Siendo obtenido de esta manera el valor de la relación raíz-punta es de 0,5 con un radio de punta de 0,153917023 m. (ecuación (2)) (Ver Figura 2).

$$r_h = 0.5 * 0,153917023 \text{ m} = 0.07695 \text{ m} \quad (2)$$



**Figura 2.** Triángulos de Velocidad [2]

Tras determinar los radios de la punta y raíz se realizó el cálculo de la altura por medio de la ecuación (3).

$$h_{alabe} = r_t - r_h = 0.07695 \text{ m} \quad (3)$$

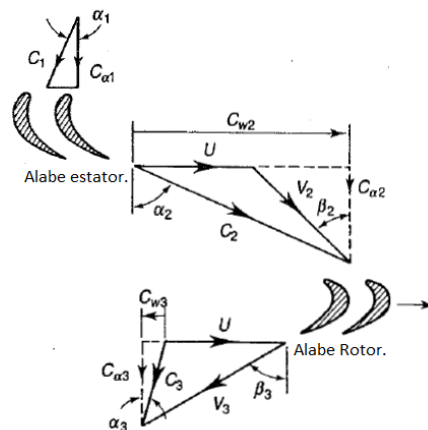
Para calcular la cuerda del perfil, se debe tener en cuenta la relación altura-cuerda (*h/c*); la cual es directamente proporcional al aumento de la probabilidad de la generación de vibraciones en el motor. Debido a que estas características son difícilmente predecibles, dicho valor se encuentra en un rango de 3 a 4 para obtener una mejor eficiencia [2]. Teniendo en cuenta lo anterior se estableció una relación *h/c* de 3 (ecuación (4)).

$$\frac{h}{c} = 3 \quad (4)$$

Conociendo la altura (*h*) del álabes, se obtuvo la cuerda del perfil asumida por medio de la ecuación (5).

$$c = \frac{0.0769}{3} = 0.02562 \text{ m} \quad (5)$$

Luego de obtener los datos de dimensionamiento del álabes, se llevó a cabo el análisis de los triángulos de velocidades del álabes. En esta fase se tuvo que determinar los ángulos de deflexión del fluido ( $\beta_2$ ) y ( $\beta_3$ ) (Ver Figura 3). En el presente estudio se asumió que la velocidad axial es constante a lo largo de toda la etapa de turbina. Además, se supuso que el flujo de gas proveniente de la cámara de combustión entra a la turbina de alta con un ángulo de incidencia de ( $\alpha_1 = 0^\circ$ ) y sale con un ángulo ( $\alpha_3 = 15^\circ$ ). Todos estos parámetros se pueden observar en la Figura 3 [2].



**Figura 3.** Triángulos de Velocidad [2]

Especificando los parámetros anteriormente mencionados y los datos obtenidos en la plataforma Gasturb, se llevó a cabo el cálculo de la capacidad de trabajo que se presenta en la etapa, es decir, el coeficiente de carga del álabe o también conocido como "Temperature Drop coefficient" como se muestra en la ecuación (6).

$$\varphi = \frac{2 * C_p * \Delta T_{0s}}{U^2} = 2.097 \quad (6)$$

También es necesario calcular el coeficiente de flujo o "Flow coefficient", el cual determina la relación que existe entre la velocidad axial del flujo de aire que atraviesa la etapa de turbina y la velocidad rotacional de esta misma, este valor se calculó con la ecuación (7).

$$\phi = \frac{C_a}{U} = \frac{175}{350} = 0,5 \quad (7)$$

Al conocer el valor del coeficiente de carga del álabe ( $\varphi$ ), se realizó el cálculo del ángulo de salida de deflexión del álabe ( $\beta_3$ ) implementando la ecuación (8).

$$\tan \alpha_3 = \tan \beta_3 - \frac{1}{\phi} \quad (8)$$

$$\beta_3 = \text{atan} \left( \tan \alpha_3 + \frac{1}{\phi} \right)$$

$$\beta_3 = 57.7064^\circ$$

Determinando dicho parámetro ( $\beta_3$ ), fue posible calcular el grado de reacción de la etapa ( $\Lambda$ ) como se muestra en la ecuación (9). Este valor expresa la fracción de la expansión que ocurre en el rotor con respecto a la expansión que ocurre en toda la etapa; siendo usualmente definido en términos de la temperatura estática o de la entalpía.

$$\tan \beta_3 = \frac{1}{2\phi} \left( \frac{1}{2}\varphi + 2\Lambda \right) \quad (9)$$

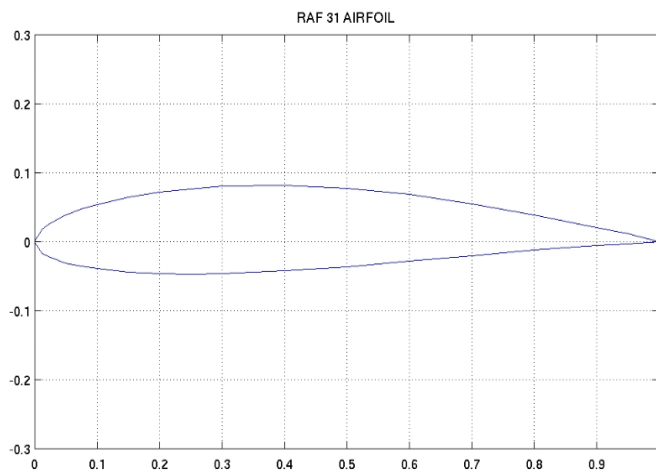
$$\Lambda = 0.66795$$

Tras obtener la magnitud del grado de reacción fue posible determinar el valor del ángulo ( $\beta_2$ ) utilizando la ecuación (10).

$$\beta_2 = \text{atan} \left( \frac{1}{2\phi} \left( \frac{1}{2}\varphi + 2 * \Lambda \right) \right) \quad (10)$$

$$\beta_2 = 11.5215^\circ$$

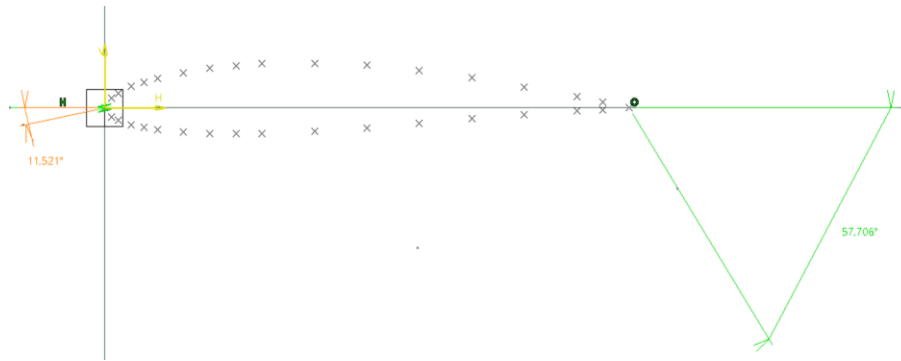
A partir de los cálculos térmicos, de dinámica de gases, triángulos de velocidades y los ángulos de deflexión del fluido, se elaboró el diseño y selección del perfil aerodinámico del álabe estator de turbina. En principio, se tomaron como referencia los perfiles de la serie RAF, los cuales son sugeridos en el libro de Saravanamuttoo [2]. Teniendo en cuenta, los requerimientos geométricos establecidos en la investigación, se seleccionó un perfil aerodinámico de alto espesor como lo es el perfil RAF 31, presentado en la Figura 4.



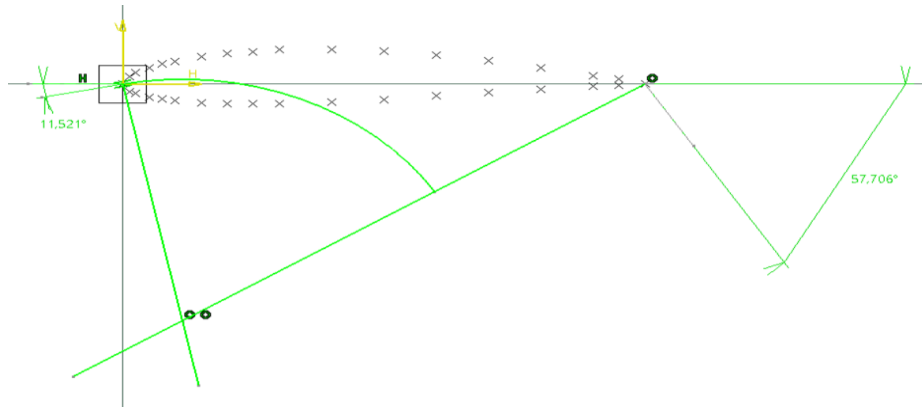
**Figura 4.** Perfil RAF 31 [3]

A partir de la elección del perfil aerodinámico y teniendo en cuenta los ángulos de incidencia del flujo sobre el álabe (triángulo de velocidades) y parámetros geométricos del mismo, se utilizó el software CATIA V5 para hacer el modelamiento del componente (Ver Figuras 5 y 6).

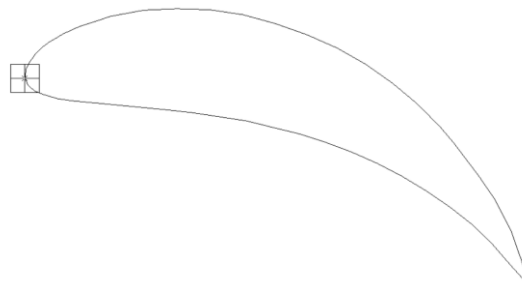
Al conocer la geometría de la cuerda del perfil diseñado, se transportaron los puntos del perfil base (RAF 31) respecto a la nueva cuerda del perfil; al implementar el uso de la plataforma Excel se determinó la coordenada de cada uno de los puntos, teniendo en cuenta que deben ser de manera ortogonal a la cuerda del perfil aerodinámico; dando como resultado la forma geométrica mostrada en la Figura 7.



**Figura 5. Ángulos de deflexión del perfil**



**Figura 6. Punto de Intersección**



**Figura 7. Geometría Perfil**

Con el fin de poder construir el álabe estator para ser adaptado a un banco de pruebas operativo de transferencia de calor para álabes de turbina, fue necesario realizar el escalamiento del mismo, ya que por condiciones de manufactura la construcción de estos en tamaño real requiere de tecnología avanzada. Para el proceso de escalamiento del álabe fue necesario calcular el número de Reynolds siendo fundamental conocer la densidad del aire en la etapa de la turbina, la cual fue establecida a través del software GasTurb (ecuación (11)). A la vez, fue necesario conocer la viscosidad cinemática del fluido, la cual puede ser obtenida por medio del libro de Cengel [3]. La Tabla 4 indica los valores de entrada para el cálculo del número de Reynolds.

**Tabla 4.** Tabla de propiedades del fluido [3]

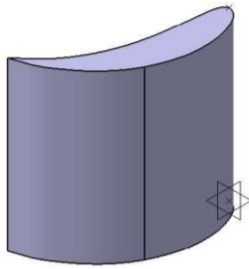
Propiedad	Valor
Densidad	6,23 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad cinemática	2.37*10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s

$$Re = \frac{Va * C}{\nu} = 1.9 * 10^4 \quad (11)$$

Considerando la magnitud del número de Reynolds, es importante conocer las características de operación del soplador que se utilizó en el banco de pruebas para la distribución de flujo másico. La velocidad a la cual este opera es aproximadamente de 30 m/s, entonces, se realizó el escalamiento de la cuerda en función de dichos parámetros mostrados en la ecuación (12).

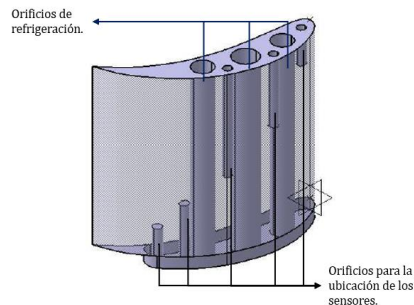
$$C = \frac{Re * \nu}{Va} = 0.1496 \text{ m} \quad (12)$$

Obtenidas las dimensiones de la cuerda y la altura según los cálculos térmicos y de dinámica de gases, se tuvieron que considerar las restricciones de manufactura. Aclarando que el álabe fue construido en la máquina CNC dispuesta en la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá. Debido a las restricciones en el proceso de fabricación, se estipuló que la altura del álabe debía ser restringida a 15 cm. El diseño del álabe se realizó en el software CATIA V5, como se muestra en la Figura 8.



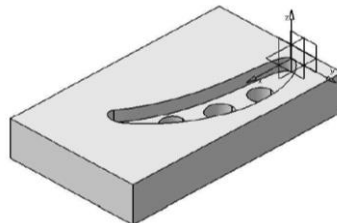
**Figura 8.** Diseño del álabe estator de turbina

Al tener el álabe modelado, se diseñó el sistema de refrigeración que está incorporado en el álabe estator. Básicamente en los motores actuales, estos sistemas permiten que la sección de turbina de alta soporte las altas temperaturas de los gases provenientes de la cámara de combustión. Por esta razón, fue indispensable utilizar ductos a lo largo de todo el componente de forma circular, esto debido a la disponibilidad en los procesos de manufactura (Figura 9), teniendo en cuenta el diámetro de las brocas disponibles en el mercado. Como los ductos se encuentran a lo largo del álabe, los orificios se abrieron por ambas caras. Así mismo, se tuvo en cuenta que el álabe es adaptado a un banco de pruebas en donde se le realizaron mediciones de temperatura a través del mismo con el fin de identificar los parámetros de transferencia de calor. Por lo tanto, se debían considerar los orificios de refrigeración y a la vez los orificios en los cuales los sensores de medición fueron instalados a lo largo de la cuerda del perfil (Figura 9).



**Figura 9.** Diseño de los orificios de refrigeración

En la Figura 9, se puede denotar una pestaña sobresaliendo en la parte inferior del álabe. Este elemento tiene la función de sujetar el álabe a una base que en conjunto sirven de soporte para la instalación al banco de pruebas. El método de sujeción se puede ver en la Figura 10.



**Figura 10.** Soporte del álabe

## 2.2 Construcción del álabe

El material para construir el álabe fue aluminio 6061 T6 debido a la facilidad de fabricación y propiedades de conducción de calor. Se adquirieron bloques de aluminio con unas dimensiones de 17x10x17 cm y 3x10x17 cm, las cuales permitieron el maquinado de las piezas. En la figura 11 se observa el proceso de manufactura del álabe en la máquina CNC.



**Figura 11.** Maquinado del álabe en la CNC

Mediante el software Mastercam, se realizó la programación necesaria para generar el acople entre las dos figuras geométricas. Dada la complejidad y la curvatura del álabe, fue necesario implementar un cuarto eje de mecanizado para evitar el choque del material con la herramienta. Para el anclaje del componente, fue obligatorio hacer una circunferencia en la parte inferior del álabe para finalmente trabajar en 3 grados, a 0, 90 y 180. El tiempo de maquinado fue aproximadamente 10 horas, abarcando todo el proceso. En la Figura 12 se muestra el resultado preliminar de la manufactura de los componentes (álabe estator de turbina y soporte).



Figura 12. Álabe y soporte mecanizado

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Transferencia de calor por aletas

Al iniciar este análisis, fue indispensable asumir ciertos comportamientos a través del álabe estator de turbina. En primer lugar, se debía tener en cuenta que, no hay transferencia de calor interna forzada por los orificios de refrigeración, ya que se presenta un fluido estático. En segundo lugar, se remitieron los datos correspondientes a un intercambiador de calor, los cuales se exponen en la Tabla 5; siendo estas las condiciones de operación a la entrada del álabe estator de turbina. De estas variables se consideraron principalmente: la temperatura del flujo del aire, el coeficiente de termoconductividad del aire tras pasar por el intercambiador de calor, las propiedades térmicas del material en el que está fabricado el álabe (aluminio 6061 T6) y características geométricas del álabe estator de turbina que se pueden observar en la Figura 13.

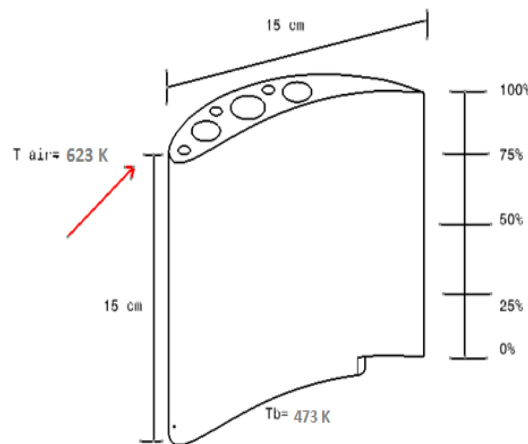


Figura 13. Diagrama Álabe como Aleta

Tabla 5. Datos de las propiedades del sistema [5]

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura Salida Intercambiador	623	K
Coefficiente de Conductividad Aluminio T6 6061	167	W/m*K
Altura	0.15	m
Área Superficial Álabe	0.002	m <sup>2</sup>
Perímetro	0.3373	m
Temperatura deseada en la base	473	K
Coefficiente de Convectividad Aire a 350°C	57.35	W/m <sup>2</sup> *K

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, se realizó el cálculo de la magnitud que relaciona condiciones geométricas y coeficientes de transferencia de calor, dicha operación se presenta en la ecuación (13) [4].

$$a = \sqrt{\frac{h \times P}{K \times A_s}} = \sqrt{\frac{(57.35 \frac{W}{m^2 \cdot K}) \times (0.3373 m)}{(167 \frac{W}{m \cdot K}) \times (0.002 m^2)}} = 7.61 \quad (13)$$

A partir del cálculo obtenido por medio de la ecuación (4), es posible establecer la temperatura de cada segmento en función de la distancia a la raíz a partir de la ecuación (14).

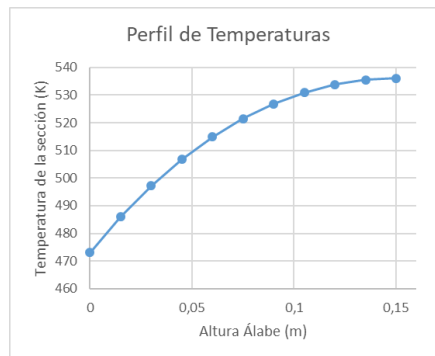
$$T(x) = T_{\infty} - \left( \frac{\cosh(a(L-x))}{\cosh(a*L)} \right) (T_{\infty} - T_b) \quad (14)$$

Posteriormente, se evalúa la ecuación a la distancia deseada encontrando como resultado la temperatura en dicho punto. La Tabla 6 indica los valores de temperatura a través del álabe.

**Tabla 6.** Datos de perfil de Temperatura del Álabe

Porcentaje de la Altura %	Distancia (m)	Temperatura alcanzada (K)
0	0	473
0.1	0.015	486.006168
0.2	0.03	497.225196
0.3	0.045	506.803442
0.4	0.06	514.865857
0.5	0.075	521.51762
0.6	0.09	526.845504
0.7	0.105	530.919014
0.8	0.12	533.791291
0.9	0.135	535.499805
1	0.15	536.066844

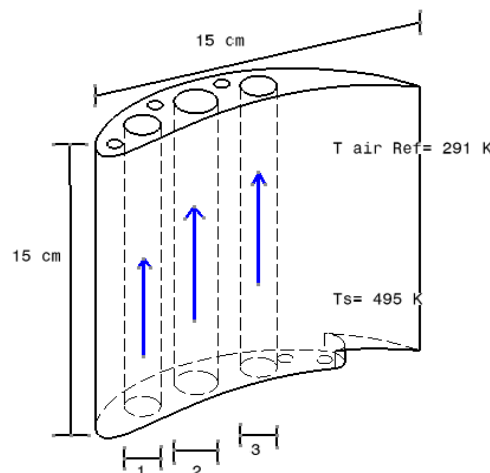
A continuación, en la Figura 14, se muestra como es la variación de la temperatura en función del porcentaje de altura del álabe.



**Figura 14.** Diagrama Perfil de Temperaturas Álabe como Aleta

### 3.2 Transferencia de calor por convección interna forzada

En la determinación y análisis de la transferencia de calor por convección interna forzada, se tomaron nuevamente datos del intercambiador como se mencionó anteriormente. Considerando a su vez, que el álabe estator de turbina se encuentra refrigerado en su interior bajo las siguientes condiciones: la temperatura del flujo y el flujo másico que brinda el dispositivo de suministro de aire, características geométricas, cantidad de conductos de refrigeración y sus dimensiones (Ver Figura 15).



**Figura 15.** Diagrama Álabe con ductos de refrigeración

Primero se debía calcular la temperatura media del fluido para obtener los parámetros físicos, como se muestra en la ecuación (15).

$$T_m = \frac{T_i + T_e}{2} = \frac{495K + 291K}{2} = 393 K \quad (15)$$

Estableciendo una temperatura media de  $T_m = 120^\circ\text{C}$ , se estimaron las magnitudes de las propiedades del fluido mostradas en la Tabla 7 [4].

**Tabla 7.** Valor del fluido

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	0.8977	$\text{Kg}/\text{m}^3$
Cp	1011	$\text{Kj}/\text{Kg K}$
Coficiente de Conductividad del Aire a $350^\circ\text{C}$	0.03235	$\text{W}/\text{m K}$
Viscosidad cinemática	0.00002522	$\text{m}^2/\text{seg}$
Pr	0.7073	N/A

A continuación, se calcularon los valores del flujo másico individualmente por un conducto de refrigeración, como se muestra en la ecuación 16.

$$\dot{m}_{ind} = \frac{\dot{m}_{Total}}{3} = \frac{(0.418 \text{ Kg/s})}{3} = 0.14 \text{ Kg/s} \quad (16)$$

A su vez, fue posible determinar el diámetro hidráulico de cada conducto de refrigeración (ecuación (17)), y el área de la sección transversal por donde circula el fluido (ecuación 18) para determinar el número de Reynolds en el conducto (ecuación (19)).

$$Dh = 2 * R = 2 * 0.0085 \text{ m} = 0.017 \text{ m} \quad (17)$$

$$As = \pi * R^2 = \pi * 0.0085^2 \text{ m} = 0.000227425 \text{ m}^2 \quad (18)$$

$$Re = \frac{\dot{m} * Dh}{As * \nu} = \frac{(0.14 \text{ Kg/s}) * (0.017 \text{ m})}{(0.000227425 \text{ m}^2) * (0.00002522 \text{ m}^2/\text{s})} = 413376.2981 \rightarrow \text{Flujo Turbulento} \quad (19)$$

Posteriormente, como se muestra en la ecuación (20), se verificó la longitud a la que se desarrolla el flujo completamente.

$$Lh = 10(Dh) = 10 * 0.017 \text{ m} = 0.17 \text{ m} \quad (20)$$

Para flujos totalmente turbulentos desarrollados en el tubo se calculó el número de Nusselt por medio de la ecuación (21).

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * (Pr)^{0.3} \quad (21)$$

$$Nu = 0.023 * 413376.2981^{0.8} * (0.7073)^{0.3}$$

$$Nu = 645.18$$

Gracias a esta variable, fue posible estimar el factor de termo-conductividad del aire, por medio de la ecuación (22).

$$Nu = \frac{h * D}{K} \quad (22)$$

$$h = \frac{Nu * K}{D} = \frac{645.18 * 0.03235}{0.017 \text{ m}}$$

$$h = 1226.55 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}}$$

La magnitud de la Temperatura de salida del aire de refrigeración puede calcularse a partir de la ecuación (23).

$$Te = Ts - (Ts - Ti) e^{\frac{-h * As}{\dot{m} * Cp}} = 306.52074 \text{ K Ec.23[4]}$$

Posteriormente se calculó la velocidad de disipación de calor del flujo de refrigeración bajo la ecuación (24). Resaltando que esta tasa de disipación de calor es únicamente referente a un orificio.

$$Q = \dot{m} * Cp * (Te - Ti) = 26550.31926 \text{ W} \quad (24)$$

Finalmente, se calculó por medio de la ecuación (25), dicha tasa de disipación de calor para todas las secciones.

$$Q = N * \dot{m} * Cp * (Te - Ti) = 79650.95777 \text{ W} \quad (25)$$

Es decir que para tres agujeros de refrigeración con un flujo a lo largo de estos con condiciones como las anteriormente mencionadas, la tasa de disipación de calor tiene un valor de: 79.65 KW, con la configuración geométrica establecida en el álabe.

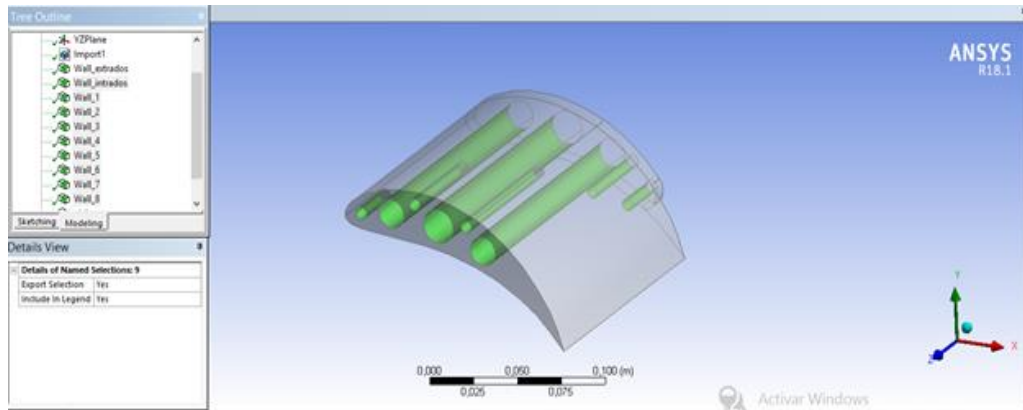
### 3.3 Análisis térmico del álabe en ANSYS Workbench

El análisis térmico permite observar el comportamiento del material frente a cambios de temperatura. Para realizar la simulación en ANSYS Workbench, se tuvieron en cuenta los parámetros señalados en la Tabla 8 a una temperatura media de 457.79 K. Se utilizó Aluminio 6061 T6 como material de análisis de manufactura. El primer parámetro que definió el análisis fue la termoconductividad que tiene un valor de 0.036778 W/m\*K el cual se ingresó en la biblioteca de ANSYS; permitiendo así, caracterizar el material bajo ciertas condiciones establecidas. De igual manera, se determinaron las fronteras para la parte del intradós y extradós del álabe estator de turbina. Adicionalmente cada uno de los orificios de refrigeración y de sensores se tomaron como paredes como se observa en la Figura 16.



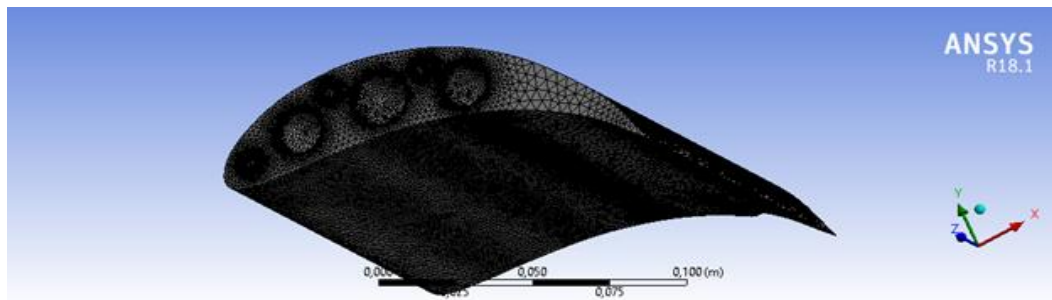
**Tabla 8.** Propiedades para Aluminio

Parámetro	Valor Intermedio
Densidad ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	0.77092
Cp ( $\frac{J}{Kg*K}$ )	1019.958
K ( $\frac{W}{m*K}$ )	0.036778
$\nu$ ( $\frac{m^2}{seg}$ )	3.27019 E-5
Pr	0.69876



**Figura 16.** Fronteras en el álabe

Posteriormente, se generó el enmallado del álabe para que el análisis térmico se pudo llevar a cabo en cada sección de la geometría. (Figura 17).



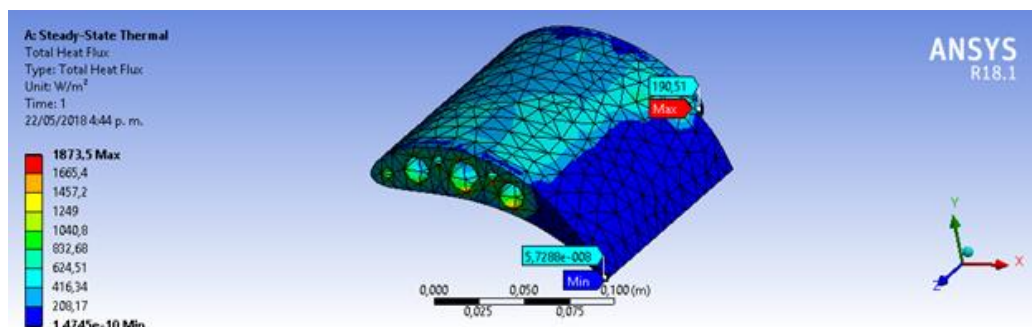
**Figura 17.** Enmallado del álabe

Para realizar el análisis térmico se utilizó la herramienta Steady State Thermal de ANSYS Workbench que permite estimar el comportamiento térmico en una geometría. Teniendo la malla elaborada, se establecen las siguientes condiciones de frontera para cada sección del álabe obtenidas de la medición en pruebas realizadas a la geometría (Ver Tabla 9).

**Tabla 9.** Condiciones de frontera

Frontera	Temperatura (K)	Coefficiente de Termo-convectividad ( $W/m^2*K$ )
Extradós	373	57.350
Intradós	373	57.350
Orificios de Refrigeración y Sensores	295	57.350

A continuación, en la Figura 18 se observa la distribución y el comportamiento de la temperatura a través del álabe.



**Figura 18.** Flujo de Calor a través del Álabe

Por otra parte, en la Figura 18 se expone la distribución de calor total a lo largo de la superficie del álabe debido a que este va a estar en contacto directo con el flujo de calor que proviene del sistema de calefacción diseñado. Sin embargo,

se puede establecer que dicha distribución se concentra en la parte superior derecha del extradós del perfil. Esto debido a que la velocidad que posee el flujo no permite que este se desarrolle sobre la superficie completa. Concentrándose la mayor temperatura en esta zona con un valor máximo alcanzado de 100.64 °C (373.64 K) y un flujo de calor total máximo de 1873.5 W/ (m<sup>2</sup>\*K).

### 3.4 Análisis térmico del álabe en ANSYS Fluent

En el análisis térmico en Fluent, se utilizó la malla previamente analizada en la simulación térmica con ANSYS Workbench y se usaron las mismas fronteras las cuales son: la parte del intradós y extradós, además de considerar cada uno de los orificios de refrigeración y de sensores como paredes. Adicionalmente se creó un sistema coordinado paralelo a lo largo del álabe estator de turbina, con el fin de poder observar el comportamiento de la temperatura en esa dirección. Además, se estableció que las condiciones de frontera iban a ser las siguientes: para la pared del extradós e intradós se introduce una temperatura de 423 K y un coeficiente de transferencia de calor de 57.350 W/ (m<sup>2</sup>\*K); como los orificios de refrigeración y los sensores se asumen como paredes; la malla se expone en la Figura 19.

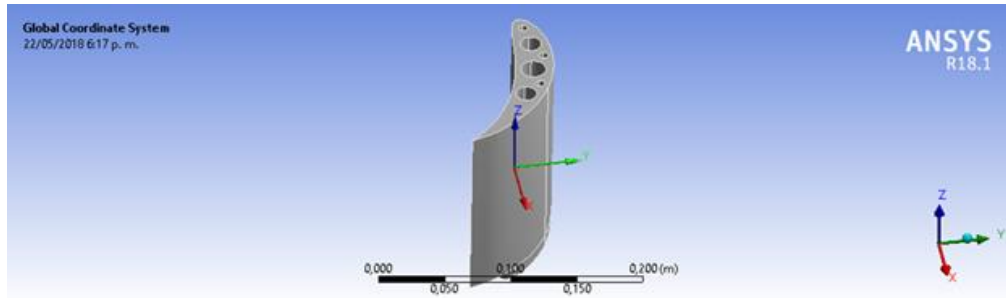


Figura 19. Sistema Coordinado

Posteriormente, se utilizó la herramienta Fluent para realizar el análisis térmico, en el apartado de Models, dejando activo el modelo de energía; debido a que se estableció que el material del álabe estator de turbina es Aluminio 6061 T6, en el apartado Materials se asignó el valor de calor específico 1019.958 Kj/(Kg\*K) y termoconductividad de 0.036778 W/m\*K calculados previamente Figura 20).

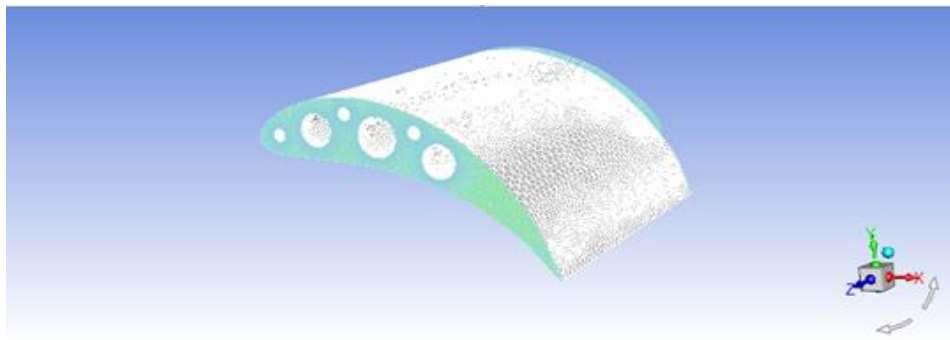


Figura 20. Álabe en Fluent

Una de las partes más importantes de la simulación fue definir las condiciones de frontera, en la herramienta Boundary Conditions en el apartado wall intradós y wall extradós. Estas condiciones fueron: Coeficiente de transferencia de calor de 57.350 W/ (m<sup>2</sup>\*K) y temperatura de corriente libre de 423K medidas en el artículo del banco de pruebas. Para las secciones wall se asignó una temperatura aproximada al ambiente de 298 K (25°C). Posterior a ello, se realizó la inicialización y la solución de la simulación, dando como resultado, la visualización gráfica mostrada en la Figura 21; donde se expone el contorno de temperatura formado sobre el álabe estator de turbina.

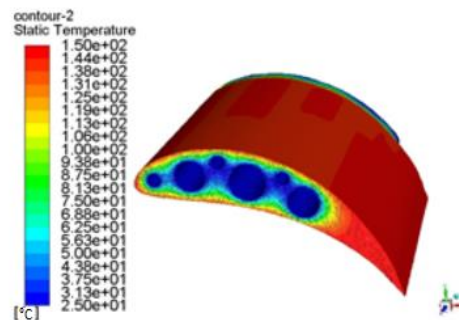


Figura 21. Contornos de Temperatura Álabe

A partir de lo anterior, es posible evidenciar los contornos de temperatura estática en donde el flujo de calor tiene una distribución en la cual la superficie exterior del álabe estator de turbina, es la que sufre la mayor carga térmica, por lo

que se encuentra expuesta directamente a flujo de calor que proviene del sistema de calefacción. Debido a la geometría del perfil y a los orificios de refrigeración y de sensores, se puede observar, hacia el centro del álabe, una mejor distribución de la temperatura. Además, se evidencia una disminución térmica en esta zona desde 423 K (150°C) hasta 298 K (25°C) aproximadamente temperatura ambiente.

#### **4. CONCLUSIONES**

- Teniendo en cuenta los resultados mostrados anteriormente, es posible afirmar que los agujeros de refrigeración permiten una disipación de calor adecuada, ya que por medio de estos se extrae del álabe estator de turbina, 79.65 KJ de energía por segundo, en otras palabras, se reduce el valor de la temperatura en la periferia de los contornos de los orificios a 87.5 °C; también es cierto afirmar que los orificios de refrigeración tienen un impacto directo para que el material soporte cargas térmicas considerablemente altas. Según el análisis térmico, estudiando el álabe como una aleta, la temperatura que alcanzaría esta sección sería de unos 536.066 K (263.066°C). De acuerdo con el análisis realizado en ANSYS Fluent, la temperatura máxima que alcanza el álabe oscila entre los valores de 373.64 K (100.64°C) a 423K (150°C). Es decir, la diferencia de temperatura varía entre los 162.426K y 113.066K, haciendo posible que el material pueda soportar temperatura elevadas de flujo de calor.
- A partir del diseño del álabe estator de turbina, se puede concluir que los ángulos de deflexión del fluido en este son de gran importancia, ya que de ellos depende la disminución de temperatura en la etapa respectiva. El ángulo de entrada debe ser de 11.52° y el de salida 57.7°, para lograr los parámetros de operación del motor especificados en el coeficiente de carga de álabe, el coeficiente de flujo y el grado de reacción calculados. Siguiendo la metodología establecida, fue posible diseñar el perfil aerodinámico para álabe estator de turbina perteneciente al motor CFM-56 logrando cierta semejanza con los perfiles utilizados para estos álabes. Dimensionando el álabe, este debe tener 2.5 cm de cuerda y 7.6 cm de altura siendo estas medidas muy similares a las de un álabe estator utilizadas en motores a reacción.
- Los resultados obtenidos evidencian que el comportamiento del álabe en la práctica es muy similar a los cálculos ideales, el flujo total de temperatura se concentra en la superficie superior del álabe y se observa que la temperatura se mantiene en el extradós del perfil. Con lo anterior se comprueba que el flujo es turbulento y no se alcanza a desarrollar a lo largo del álabe como lo demuestran los cálculos realizados previamente.
- Para la parte de transferencia de calor teórica del álabe, se observa que los métodos necesarios para determinar el comportamiento del perfil de temperaturas y la distribución de calor a lo largo de su superficie deben ser complementados con cálculos en programas computacionales, con el fin de determinar los parámetros de operación se deben asumir algunos valores o idealizar el fenómeno físico para delimitar el estudio térmico.

#### **Agradecimientos**

A los estudiantes del programa de Ingeniería Aeronáutica de octavo semestre de la Universidad de San Buenaventura, integrantes del grupo de la asignatura Construcción de Motores 2, que hicieron posible la ejecución del proyecto. Jesús Blanco, Luisa Castillo, Bibiana Chaparro, Luz Angela Ibarra, Andrés Ibarra, Diego Jaimes, Michael Sánchez y al profesor tutor Rafael Mauricio Cerpa.

## REFERENCIAS

- [1] Training, L. (1999). ATA 71-80 Training Manual A319 A320.
- [2] Saravanamuttoo, H. (2013). Gas Turbine Theory. Noida.
- [3] U. A. A. Group. [UIUC Airfoil Coordinates database](#). Online (May 2018).
- [4] Cengel, Y. & Ghajar, A. (2007) Transferencia de calor y masa. McGrawHill.
- [5] MatWeb. [Aluminum 6061-T6; 6061-T651](#). Online (May 2018).

# Diseño y construcción de un banco de pruebas para un álabe estator de turbina

Bibiana Chaparro<sup>1</sup>

Michael Sánchez<sup>2</sup>

Andrés Ibarra<sup>3</sup>

Luz Ibarra<sup>4</sup>

Rafael Cerpa<sup>5</sup>

Diego Jaimes<sup>6</sup>

Universidad de San Buenaventura  
Bogotá – Colombia

El cambio térmico que sufren los álabes de turbina debido al impacto de los gases provenientes de la cámara de combustión permite realizar diversos estudios de gran importancia a nivel industrial; por lo tanto, es necesario analizar el fenómeno térmico que se desarrolla en los álabes de turbina haciendo el diseño y construcción de un banco de pruebas que simule el fenómeno de transferencia de calor a lo largo de un álabe estator de turbina. El actual capítulo presenta el proceso realizado para obtener el diseño y poder hacer la construcción de un banco de pruebas, así como la adaptación de un sistema de intercambiador de calor; que permite elevar la temperatura del aire que impacta el álabe para el análisis. Fue también necesaria la instalación de sensores térmicos dentro del álabe para medir la temperatura interna del material. Para comprobar que los datos de los sensores estuvieran correctos, se utilizó una cámara termográfica para poder obtener el comportamiento térmico a lo largo del elemento examinado. A partir de los resultados obtenidos teórica y experimentalmente se puede observar la similitud en estos datos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Estudiar térmicamente los fenómenos de transferencia de calor en una turbina resulta de gran importancia para el diseño de álabes de turbina. Un buen análisis térmico es relevante para determinar la vida útil del componente. Para esto, es importante entender cómo es el proceso de transferencia de calor y cuáles son las áreas con mayor exposición a altas temperaturas teniendo en cuenta la geometría del perfil. Es necesario por esto, buscar alternativas eficientes térmicamente para hacer las pruebas reales de álabes de turbina, por lo tanto, se requiere diseñar y construir un banco de pruebas, capaz de analizar los fenómenos de transferencia de calor a lo largo de un álabe estator de turbina. El diseño del banco se inicia teniendo como referencia, el estudio “Análisis térmico y construcción de un álabe estator de turbina”, considerando el proceso de fabricación de este componente. Dicho proceso de manufactura se realizó en una máquina CNC, a partir de los parámetros de diseño obtenidos. El material utilizado fue aluminio 6061 T6, y a su vez, se fabricó un soporte que tiene como función unir el banco de pruebas y el álabe estator de turbina.

Posteriormente, se desarrolla el diseño y la construcción de la bancada. En ella se encuentran acoplados el intercambiador de calor y el álabe estator de turbina. La estructura está construida en perfiles estructurales y su unión se realizó mediante soldadura de arco manual con electrodo revestido (SMAW). El banco de pruebas cuenta con un intercambiador de calor, que se encarga de calentar el aire proveniente del exterior; este tiene como componente principal, una resistencia eléctrica roscada de 1500W y 220V, inmersa en un tubo de acero ubicado estratégicamente para distribuir el aire a lo largo de álabe. Para la fabricación del sistema de adquisición de datos de temperatura se contó con varios sensores LM35 calibrados en escala centígrada de -55°C a 150°C. Estos tienen tres bifurcaciones que inducen un voltaje, el cual pasa por el transductor que convierte la señal de voltaje en una señal de salida de temperatura entregada a un arduino de referencia Mega2560.

Después de construir la bancada y acoplar los componentes del sistema en la misma, se realizan pruebas funcionales, para evidenciar cómo el aire de entrada distribuye la temperatura a lo largo del álabe. Al momento de presentarse un incremento en la temperatura, el sistema de adquisición de datos muestra en la interfaz diseñada en Matlab los datos medidos, y para contrastar dicha información se utiliza una cámara termográfica FLIR que dependiendo el lugar de enfoque específica y expone la temperatura en determinado punto. Finalmente, se compara esta información encontrada con el sistema de adquisición de datos y las imágenes obtenidas en la cámara termográfica, correlacionando ambos parámetros de salida obtenidos.

## 2. LA BANCADA

### 2.1 Diseño

Para el diseño de la bancada se debía tener en cuenta la posibilidad de adaptar el álabe estator, el sistema de calefacción y el sistema de adquisición de datos para la toma de los parámetros de operación del álabe. La Figura 1

---

<sup>1</sup> brchaparro@academia.usbbog.edu.co

<sup>2</sup> mdsanchez@academia.usbbog.edu.co

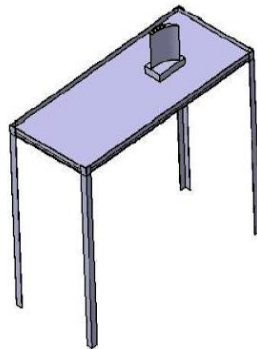
<sup>3</sup> aibarra@academia.usbbog.edu.co

<sup>4</sup> libarra@academia.usbbog.edu.co

<sup>5</sup> ing.decano@usbbog.edu.co

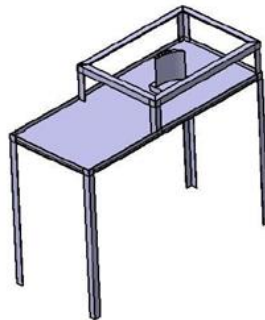
<sup>6</sup> dejaimess@academia.usbbog.edu.co

muestra el modelamiento inicial de la misma, la cual es construida a partir de perfiles estructurales de cuatro centímetros de ancho y una placa de metal con grosor de cinco milímetros, unidos entre sí por soldadura de arco manual con electrodo revestido (SMAW). El banco de pruebas va a tener dos zonas importantes; una zona fría, en la cual va a estar ubicada el sistema de admisión al intercambiador y una zona caliente, en la cual va a estar situado el intercambiador, el álabe estator de turbina y el sistema de adquisición de datos.



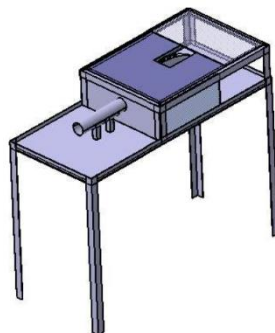
**Figura 1.** Ubicación del álabe en el banco

Por seguridad operacional, el área de funcionamiento del banco estará restringida por medio de placas de vidrio de cinco milímetros de espesor, sujetas a la mesa, a través de ángulos estructurales con 4 centímetros de ancho como se observa en la Figura 2.



**Figura 2.** Restricción de área operacional

De igual forma, se muestra en la Figura 3 que la parte superior de la bancada posee una sección cubierta por placa de aluminio de tres milímetros de espesor, en la cual se encuentra el espacio adecuado para el acceso al álabe estator de turbina, el sistema electrónico de medición y la respectiva salida flujo secundario al ambiente. Mientras que el otro segmento de dicho lugar de la bancada se encuentra protegida por medio de un vidrio de seguridad.

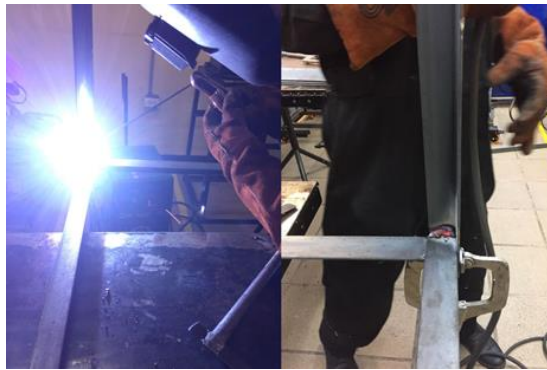


**Figura 3.** Propuesta de bancada para álabe

Finalmente, es necesario indicar que teniendo en cuenta el peso del álabe, intercambiador de calor y sistema de medición, no es requerido realizar un análisis estructural del banco; sin embargo, para su diseño se tuvieron en cuenta elementos de ergonomía y seguridad industrial para la operación del mismo.

## 2.2 Proceso de manufactura

Como se estableció en el diseño de la bancada, para la construcción de esta misma se emplearon perfiles estructurales que sirven para dar estabilidad al banco y sus componentes (cuatro perfiles de 80 cm) los cuales dan lugar a la base de la bancada. Adicionalmente, el área de operación fue delimitada por otros cuatro perfiles estructurales que en su totalidad fueron unidos mediante soldadura de arco manual con electrodo revestido (SMAW) como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Unión de perfiles para formar la Bancada

Con la estructura principal de la bancada construida se procedió a instalar una placa base para todos los sistemas que se requieran en el banco de pruebas. Dicha superficie fue añadida a la estructura por medio de soldadura arco manual con electrodo revestido (SMAW) (Figura 5).



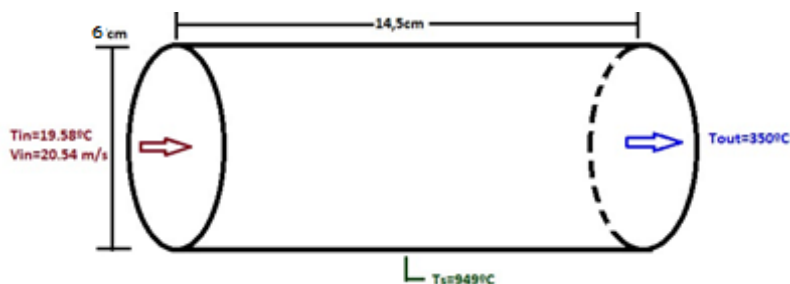
**Figura 5.** Estructura de la Bancada

### 3. CALEFACCIÓN

#### 3.1 Diseño del intercambiador de calor

Un requerimiento para el funcionamiento del banco de pruebas es el de poder generar un flujo de aire de alta temperatura para ser dirigido al álabe estator de turbina. Es decir, se debe diseñar un sistema que permita elevar considerablemente la temperatura del aire suministrado con el fin de observar el comportamiento térmico del álabe y su sistema de refrigeración. Toca añadir que para forzar el flujo de aire a través de este sistema se usó un soplador dispuesto por la Universidad. Inicialmente, se tomaron ciertos parámetros de entrada para delimitar el procedimiento, estableciendo la temperatura del aire que se desea obtener a la salida del intercambiador. Para lograr observar el fenómeno de transferencia de calor a través del álabe, se propuso una temperatura de salida de 350°C. También, se estableció la instalación de una serie de resistencias eléctricas al interior de un tubo circular de 6 cm de diámetro y 14.5 cm de largo con el fin de obtener el incremento de temperatura requerido.

Para realizar los cálculos de la velocidad de transferencia de calor que requieren generar las resistencias eléctricas a través del componente, se idealizó el caso a uno de transferencia de calor interna forzada; para tal fin, era requerido conocer la velocidad y temperatura de entrada del aire al intercambiador. Como se indicó anteriormente el suministro de flujo de aire se realiza a través de un soplador industrial, al cual se le midió la velocidad y temperatura de fluido utilizando un anemómetro, dando como resultado una velocidad de salida de 20.54 m/s y una temperatura de 19.58°C (292.73K). El último parámetro que se requería conocer era la temperatura superficial a la cual iba a estar el cilindro internamente, para lo cual se asumió que la máxima temperatura superficial sería la suministrada por la resistencia eléctrica la cual dio un valor de 949°C. En la Figura 6, se ven resumidos los parámetros de entrada para el cálculo de la transferencia de calor especificados en la Tabla 1.



**Figura 6.** Diagrama incremento de Temperatura del intercambiador

**Tabla 1.** Parámetros de entrada para el diseño del intercambiador

Parámetros de entrada	Valor
Temperatura de entrada $T_{in}$ (°C)	19.58
Velocidad de entrada (m/seg)	20.54
Temperatura de salida $T_{out}$ (°C)	350
Diámetro del intercambiador (cm)	6
Longitud del intercambiador (cm)	14.5

Inicialmente, se calculó la temperatura media del fluido, como se expone en la ecuación (1), con el fin de obtener las propiedades del aire a dicha temperatura.

$$T_m = \frac{T_i + T_e}{2} \quad (1)$$

$$T_m = \frac{19.58 + 350}{2} = 184.79 \text{ °C}$$

A partir de esta temperatura se obtuvieron las propiedades del fluido [1]. Sin embargo, teniendo en cuenta el valor resultante a partir de la ecuación (1), fue necesario desarrollar un proceso de interpolación para calcular las propiedades exactas del fluido, teniendo en cuenta las magnitudes mostradas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores de interpolación

Parámetro	Valor superior @T=200°C	Valor Inferior @T=180°C
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	0.7459	0.7788
Cp (J/kg K)	1023	1019
K (W/m K)	0.03779	0.03646
v(m <sup>2</sup> /s)	3.4 e-5	3.2 e-5
Pr	0.6974	0.6992

Realizado el cálculo por interpolación, se obtuvieron los valores reales del fluido a las condiciones de temperatura preestablecida, como se expone en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Propiedades obtenidas luego del proceso de interpolación

Parámetro	Valor intermedio
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	0.77092
Cp (J/kg K)	1019.958
K (W/m K)	0.036778
v(m <sup>2</sup> /s)	3.27019 e-5
Pr	0.69876

El siguiente paso fue el del cálculo de número de Reynolds para identificar si el flujo es turbulento o laminar (ecuación (2)).

$$Re = \frac{V_m \cdot D}{\nu} \quad (2)$$

$$Re = \frac{(20.54 \text{ m/s}) \cdot (0.06 \text{ m})}{3.27019 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 37685.7857 \rightarrow \text{flujo turbulento}$$

Adicionalmente, fue necesario determinar la longitud hidráulica para saber si el flujo se desarrolla totalmente a través del tubo, como se presenta en la ecuación (3).

$$L_h = 1.35 (Re)^{1/4} \quad (3)$$

$$L_h = 1.35 (37685.7857)^{1/4} = 18.809 \text{ m}$$

Para flujos totalmente turbulentos en tubos se calculó inicialmente el factor de fricción, el cual es obtenido por medio de la ecuación (4).

$$f = [0.790 \cdot (\ln(Re) - 1.64)]^{-2} \quad (4)$$

$$f = 0.0223$$

Con este factor de fricción fue posible estimar el número de Nusselt según la analogía de Chilton-Colburn, mostrada en la ecuación (5).

$$Nu = 0.125 \cdot f \cdot Re \cdot (Pr)^{1/3} \quad (5)$$

$$Nu = 0.125 \cdot 0.0223 \cdot 37685.7857 \cdot (0.69876)^{1/3}$$

$$Nu = 93.560$$

Siendo el anterior parámetro mencionado, el correcto para determinar el coeficiente de convectividad térmica del aire, como se muestra en la ecuación (6).

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (6)$$



$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{93.56 \cdot 0.03677}{0.06}$$

$$h = 57.35 \frac{W}{m^2 K}$$

A partir del coeficiente de convectividad térmica, se estimó la magnitud de la velocidad de transferencia de calor del intercambiador para lograr una temperatura de salida de 350°C (623K) bajo la ecuación (7).

$$Q = h \cdot A_s \cdot \Delta T_{lh} \quad (7)$$

Para esto, se requirió calcular el diferencial térmico a través de la ecuación (8).

$$\Delta T_{lh} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_i}{\ln\left(\frac{\Delta T_e}{\Delta T_i}\right)} \quad (8)$$

Donde:

$$\Delta T_i = T_s - T_i \quad (9)$$

$$\Delta T_i = 949^\circ C - 19.58^\circ C = 929.42^\circ C$$

$$\Delta T_e = T_s - T_e \quad (10)$$

$$\Delta T_e = 949^\circ C - 350^\circ C = 599^\circ C$$

Con los valores obtenidos de las ecuaciones 8 y 9 se estableció la magnitud de:  $\Delta T_{lh}$

$$\Delta T_{lh} = \frac{599 - 929.42}{\ln\left(\frac{599}{929.42}\right)} = 752.752 K$$

El último parámetro que fue calculado fue el área superficial del cilindro, la cual pudo ser hallada a partir de lo expuesto en la ecuación (11).

$$A_s = (\pi \cdot \emptyset \cdot L) \quad (11)$$

$$A_s = (\pi \cdot 0.06 \cdot 0.145) = 0.02733 m^2$$

Siendo estos valores reemplazados en la ecuación (7), con el fin de obtener el valor de la velocidad de transferencia de calor requerida (ecuación (12)).

$$Q = 57.35 \frac{W}{m^2 K} \cdot 0.02733 m^2 \cdot 752.752 K \quad (12)$$

$$Q = 1178.9906 W$$

A partir de los cálculos anteriormente enunciados, se estableció que era necesario utilizar una resistencia eléctrica de por lo menos 1178,99 W para obtener un incremento en la temperatura del aire de 19.58°C (292.78K) a 350°C (623K).

### 3.2 Análisis termográfico del intercambiador de calor.

Con los datos calculados previamente y teniendo la geometría establecida se dio inicio al proceso de selección y construcción del intercambiador de calor para ser instalado en el banco de pruebas del álabe estator. El diseño preliminar contó con una resistencia roscada, de 1500W y 220V (disponible en el mercado) de 8,5 cm de largo y 5cm de diámetro. Para determinar la temperatura superficial de la resistencia y poder realizar los cálculos de transferencia de calor de manera precisa se utilizó una cámara termográfica FLIR y adicionalmente la temperatura fue medida por medio de un multímetro UNI-T 50C utilizando una sonda tipo K de cromel-alumel. Al realizar estas mediciones, la resistencia eléctrica alcanzó una temperatura máxima de 924 °C (1197K), medida por medio de la cámara termográfica como se muestra en la Figura 7.

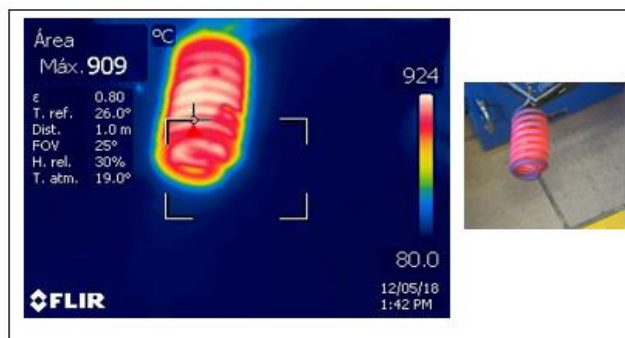


Figura 7. Análisis de temperatura resistencia-eléctrica roscada

Por otra parte, desde el diseño preliminar se estableció que, la resistencia se encuentra inmersa en un tubo de Acero Cold Rolled, de 40 cm de largo y está acoplada en uno de los extremos del tubo, en la región cercana al álabe estator de turbina. El otro extremo está libre para la entrada del flujo de aire. De igual forma se realizó un análisis térmico para determinar la temperatura superficial del tubo como se muestra en la Figura 8, observando que la temperatura de la resistencia cuando está localizada en el interior del componente alcanza un valor máximo de 1030°C (1303K).

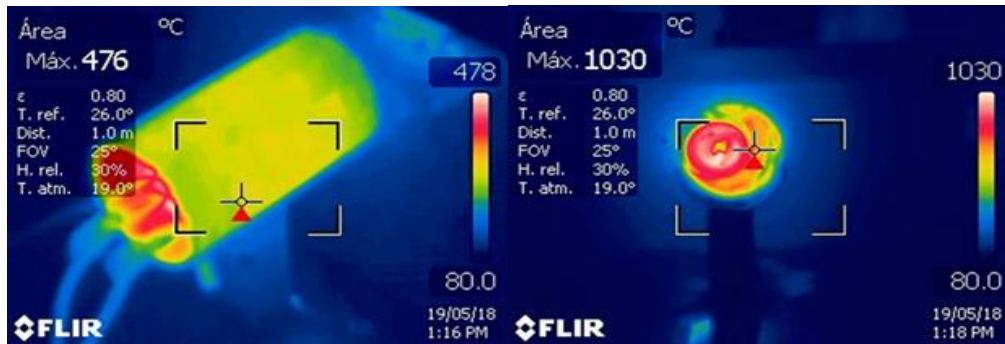


Figura 8. Temperatura superficial del tubo y la resistencia en el interior

Después de analizar la temperatura en el interior del tubo, fue necesario realizar las mediciones apropiadas para determinar la localización exacta del intercambiador de calor en el banco de pruebas. Por un lado, y teniendo como referencia el diseño de la bancada, se pudo detallar que el tubo debía estar totalmente centrado y a una altura de 10 cm de la base inferior, dado que se tiene en cuenta el soporte de álabe.

Es por ello, que fue llevada a cabo una prueba preliminar en la que se situaba el álabe en su posición y se utilizó el soplador para analizar la transferencia de calor al álabe. Además, se tomó como referencia un tiempo de 5 minutos, en el cual, soplando aire a una velocidad de 20 m/s se encontró que la temperatura superficial del borde de ataque del álabe alcanza un valor máximo de 245°C (518K) según la cámara termográfica (Figura 9). Adicionalmente, se pudo observar durante el proceso de inyección de aire caliente que la superficie del álabe va incrementando su temperatura progresivamente y que los valores de temperatura máximos se encuentran en el borde de ataque del álabe.

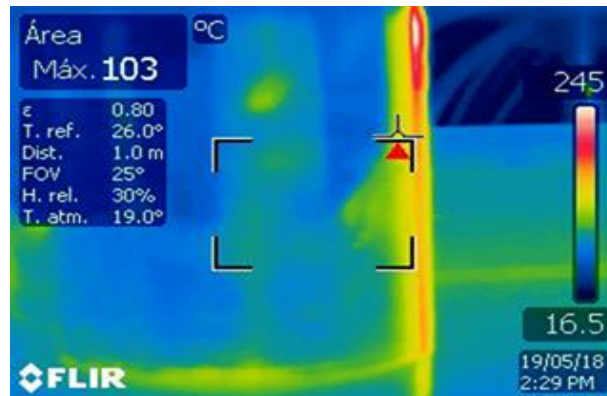


Figura 9. Temperatura superficial del tubo del álabe estator

### 3.3 Construcción del intercambiador de calor

Para la construcción del intercambiador de calor, era indispensable tener en cuenta los cálculos de transferencia de calor previamente analizados y el diseño de la bancada del componente. Considerando las elevadas temperaturas que este elemento debe soportar, se adquirió un cilindro metálico, de acero de 6 cm de diámetro y 40 cm de longitud. Como se estableció en el diseño del intercambiador, la resistencia se ubica en la zona final del tubo (Figura 10).



Figura 10. Tubo de acero utilizado como intercambiador de calor

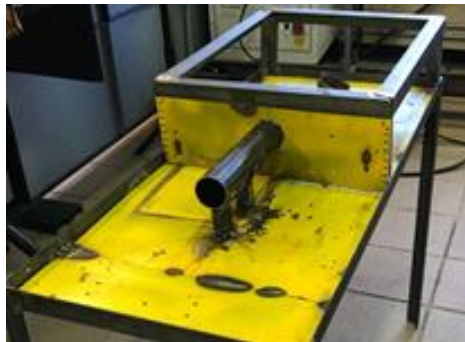
Como está determinado, para aislar la zona donde se encuentra ubicado el álabe estator de turbina, fue requerido disponer de una lámina de acero a la cual se le perforó un orificio de 6 cm de diámetro, con el fin de instalar el tubo del intercambiador dentro de la zona prueba del banco. Es importante aclarar que, el tubo se debía dejar de una longitud mayor a la establecida en los cálculos para garantizar que el fluido pueda adaptarse completamente a la geometría y llegue perpendicularmente al álabe.

El sistema de soporte se realizó conforme al diseño presentado anteriormente. Este debía construirse de tal modo que fuera seguro de operar y a la vez se mantuviera estático a la hora de ponerlo en funcionamiento. Por esta razón, se instalaron los tres soportes fijos, uno en la zona cercana a la resistencia y dos en la zona fría de la bancada. La construcción de estos soportes se desarrolló utilizando los perfiles estructurales usados en la bancada, los cuales se sujetaron para formar una geometría cuadrada. El producto final se presenta en la Figura 11.



**Figura 11.** Soportes del tubo del intercambiador y placa de acero

El tubo del intercambiador se diseñó para que pueda ser desplazado hacia adelante o hacia atrás, haciendo flexible el banco de pruebas, conforme se requiera localizar el flujo de aire caliente más cercano al álabe estator. Para finalizar la construcción del intercambiador se localizó la resistencia en su lugar. Debido a la velocidad del aire, esta tiende a modificar su posición, razón por la cual se le instaló un pasador para evitar el movimiento del componente. En la Figura 12, se ve la construcción final de intercambiador de calor.



**Figura 12.** Construcción final del intercambiador de calor

#### 4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Uno de los objetivos principales del diseño del banco de pruebas era la implementación de un sistema que permita la lectura de datos de temperatura. Para cumplir el propósito de adquirir dichos parámetros se utilizaron sensores LM35 (Figura 13), circuitos integrados de precisión calibrados a la escala centígrada con un rango de uso de  $-55^{\circ}\text{C}$  (218 K) a  $+150^{\circ}\text{C}$  (423 K), adecuados para el rango de temperaturas a las cuales se pretendía operar el banco de pruebas. Es importante tener en cuenta que este tipo de sensores no requiere de una calibración externa, ya que están debidamente configurados, ofreciendo un rango de precisión 0.25 K dentro de cada lectura de temperatura. [2]



**Figura 13.** Bifurcación esquemática del sensor LM35 [2]

Los sensores LM35 son dispositivos analógicos y cuentan con tres bifurcaciones como se muestra en la Figura 14, donde +Vs hace referencia a la conexión de la entrada que induce voltaje, desde un rango de 4V a 20V. Luego ese voltaje pasa por un transductor que convierte la señal de Voltaje en una señal de salida de temperatura, para a través de un arduino proceder a la lectura de la misma [2]. La información recibida es leída y almacenada en un dispositivo arduino. Este tipo de arduino funciona como una plataforma para los sensores LM35, con un lenguaje de programación que soporta la entrada y salida de señales. En la Figura 14, se muestra el diseño de un arduino Mega2560 el cual cuenta con 16 entradas analógicas y hasta 53 entradas digitales, así como la entrada de voltaje y la entrada a tierra.

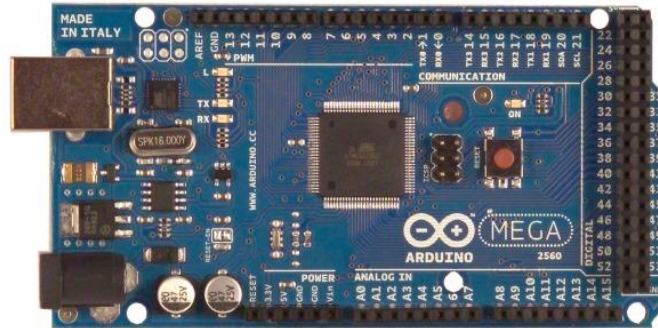


Figura 14. Arduino Mega [3]

Es muy importante tener en cuenta la conexión de cada uno de los sensores en el arduino, ya que los elementos del sensor no deben estar en contacto entre ellos, esto con el objetivo de evitar la generación de un corto circuito. Por ello, las conexiones de estos fueron debidamente diferenciadas para realizar la correcta lectura de la sección de análisis.

#### 4.1 Diseño de la interfaz

Teniendo los sensores y el arduino, se realizó una aplicación por medio del software 'MATLAB' que permite la toma de datos de temperatura en las diferentes zonas del álabe. Para realizar este procedimiento, se descargó el paquete adicional de arduino con el fin de desarrollar la conexión con el mismo. Mediante el bosquejo en 'Guide' se elaboró una ventana que permite la lectura de los sensores en tiempo real para así tener una toma de datos de las temperaturas que se registren en un periodo especificado (Figura 15). Esto fue logrado a partir de un comando que permite a Matlab llamar al arduino para obtener la lectura de los sensores y mediante la codificación *drawnow* que registrara y graficara los resultados de la toma.

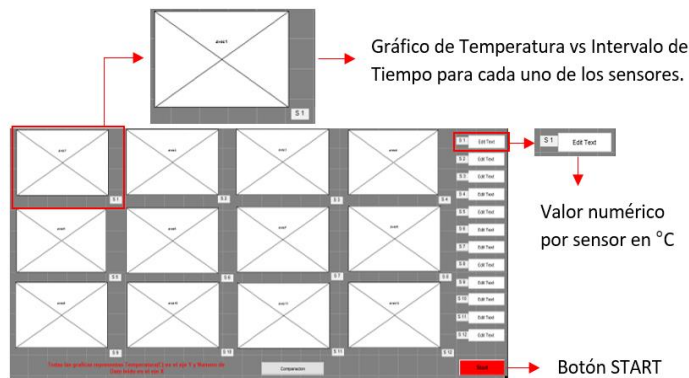


Figura 15. Ventana Principal de lectura de sensores

Además, dentro de la ventana principal se creó un botón llamado 'COMPARACIÓN' que redirige al usuario a la siguiente ventana, para realizar las respectivas comparaciones de tomas de datos de cada uno de los sensores en tiempo real. En la Figura 16 se expone el botón de activación denominado "Gráfica" el cual permite apreciar todos los sensores en una sola interfaz con el fin de diferenciar de forma visual el comportamiento que está registrando cada sensor en las diferentes zonas de lectura. El segundo botón denominado "Barras" permite al usuario comparar cada uno de los sensores de manera más exacta para la toma de resultados.

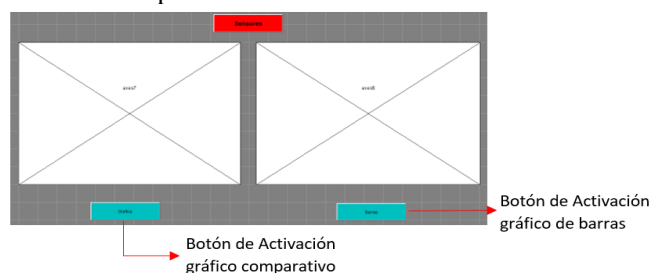


Figura 16. Ventana Comparativa de Datos

## 4.2 Funcionamiento de la programación

Para iniciar la toma de datos es necesario pulsar el botón 'START' mostrado en la Figura 16. para que inicie la respectiva lectura de datos asignadas dentro del código. Dentro de la ventana se puede apreciar el valor de cada uno de los sensores de forma numérica, con el fin de registrar los datos de forma más exacta dentro del sistema de medición. Cada uno de los datos se muestra en la ventana de *command window*, para observar cada uno de los datos de temperatura. En la ventana comparativa (Figura 16), es posible apreciar todos los sensores para diferenciar el comportamiento que está registrando cada uno de ellos en las diferentes estaciones de lectura. También se puede obtener un tipo de gráfico en barras con el fin de comparar el comportamiento de cada uno de los sensores de manera más exacta para la toma de resultados.

## 5. PRUEBAS

Los sensores son situados en la bancada como se muestra en la Figura 17, de tal forma que se evidencie la distribución de temperaturas tanto en las zonas internas del álabe como en las zonas externas más relevantes utilizadas durante el funcionamiento.

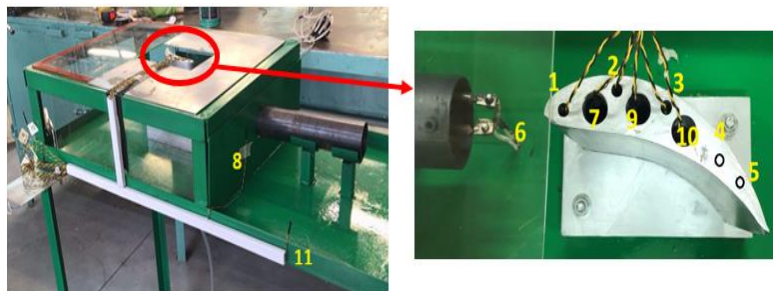


Figura 17. Ubicación de los sensores

Teniendo los sensores en la ubicación designada, se realiza la correcta conexión de estos al arduino, y se inicia la aplicación de adquisición de datos utilizando la interfaz diseñada previamente.

### 5.1 Análisis de datos

1. *Análisis termográfico de sistema de intercambiador de calor.* El análisis termográfico se realizó cuando el sistema está en funcionamiento. Este consta de dos etapas de análisis, en la primera ingresa un flujo de aire a una velocidad aproximada de 20m/s, que distribuye la temperatura a lo largo de la superficie del álabe, en la segunda se realizan mediciones de igual forma, pero esta vez entra aire a través de los ductos de refrigeración.
  - *Análisis sin aire de refrigeración.* Al poner el sistema en funcionamiento fue necesario esperar un tiempo para que la resistencia elevará su temperatura, al llegar a los 900°C (1073 K), se suministró un flujo de aire, el cual disminuyó la temperatura a 809°C (482 K) como se muestra en la Figura 18.

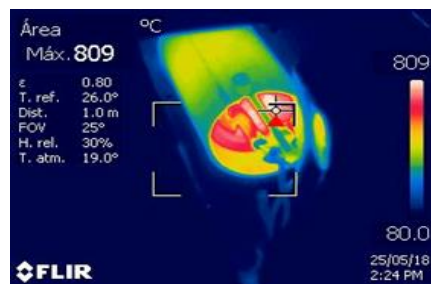


Figura 18. Ubicación de los sensores

Con el paso del tiempo, la temperatura superficial del álabe empezó a aumentar, el incremento fue mayor en el borde de ataque, debido a que es la superficie más cercana a la salida del intercambiador de calor, como se muestra en la Figura 19.

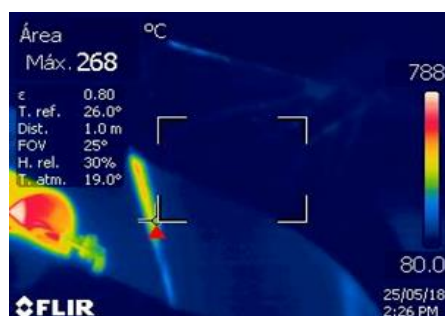


Figura 19. Incremento de temperatura en el borde de ataque del álabe

La temperatura interna fue medida en cada uno de los agujeros de refrigeración. A través del sistema de adquisición de datos, se iba mostrando progresivamente el incremento de temperatura a lo largo del álabe estator de turbina, sin embargo, con ayuda de la cámara termográfica se evidenció que efectivamente había un incremento interno progresivo que correspondía a los valores que indicaba el sistema de adquisición de datos. En la Figura 20 se muestra la vista superior del álabe, donde el cursor apunta al primer agujero de refrigeración, en la figura se observa que la temperatura interna es de aproximadamente 97°C (370 K).

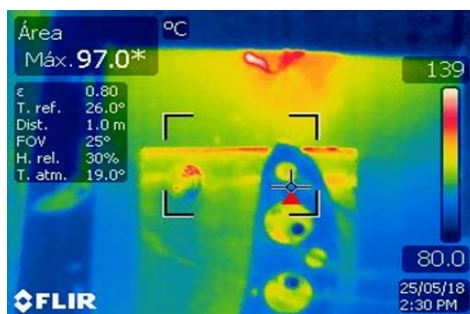


Figura 20. Temperatura interna en los agujeros de refrigeración sin aire de refrigeración

- **Análisis con aire de refrigeración.** Posteriormente, se sangró aire de refrigeración a través de un sistema de acople situado en la parte inferior del álabe estator de turbina, el sistema tiene 3 mangueras que distribuyen el aire a través de los agujeros de refrigeración, con el paso del tiempo se evidencia que, de ser suministrado el aire de refrigeración, empieza a disminuirse la temperatura en el álabe. En la Figura 21, se muestra cómo después de que ingresa el aire de refrigeración disminuye la temperatura interna en el álabe, al cabo de un tiempo hay una reducción del 18% en la temperatura interna del álabe en los agujeros de refrigeración, llegando a valores cercanos a los 80°C (353 K).

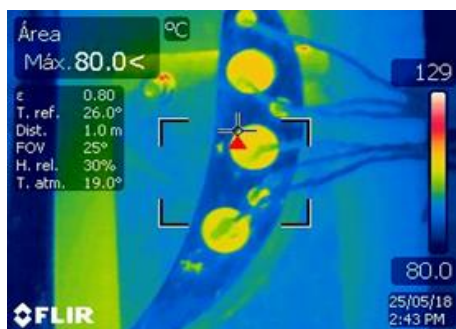


Figura 21. Temperatura interna en los agujeros de refrigeración con aire de refrigeración

## 5.2 Análisis del sistema de adquisición de datos

Durante la prueba del análisis termográfico utilizado anteriormente, mediante el uso de la interfaz diseñada, se tomaron las mediciones respectivas de cada sensor de acuerdo con la configuración mostrada en la Figura 18. Iniciando el funcionamiento, se presentó el aumento de temperatura exponencial de cada uno de los sensores (Figura 22). Es importante tener en cuenta el rango de temperatura alcanzado por cada sensor como prueba inicial de verificación de funcionamiento coherente de los datos medidos en tiempo real.

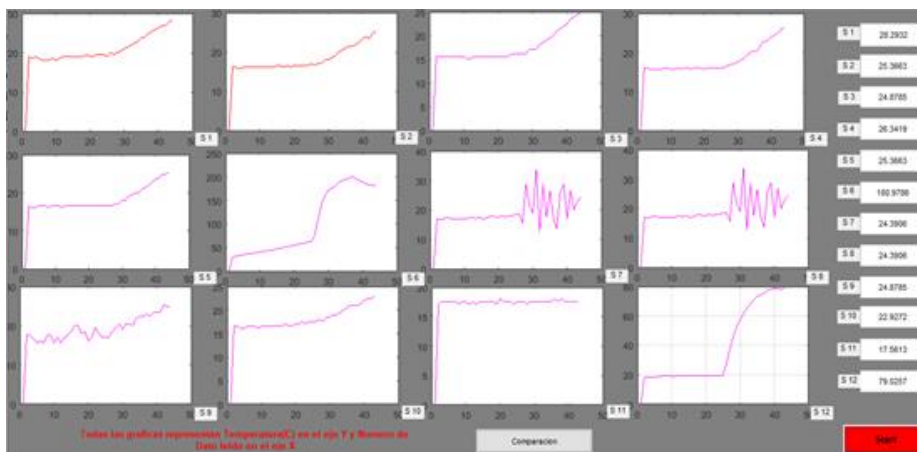
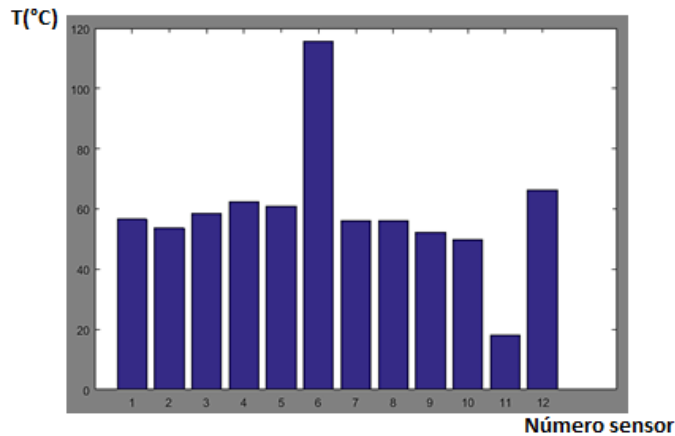


Figura 22. Lectura de sensores durante funcionamiento sin aire sangrado

Teniendo ya temperaturas estables superficiales del álabe, se inició el funcionamiento de la segunda ventana de la interfaz enseñada en la Figura 17, comparando el cambio de temperaturas tanto para la prueba inicial sin aire sangrado como con aire sangrado.

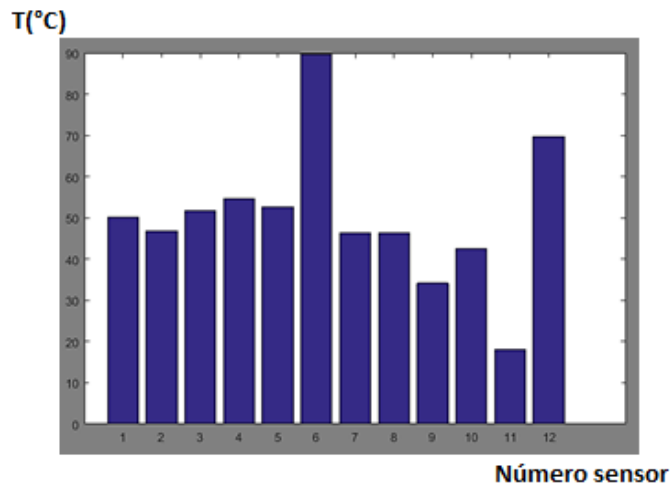
1. *Sin aire sangrado.* Los resultados registrados en la prueba sin aire de sangrado fueron registrados en la Figura 23, donde se presenta una elevada temperatura en la zona interna del álabe definida dentro de los sensores del 1 al 5 de aproximadamente 330,15 K. Adicional a lo anterior, la temperatura de salida del intercambiador de calor, presenta temperaturas de salida conformes de entre 373.15 K y 393.15 K.



**Figura 22.** Resultados sensados de la prueba sin aire sangrado

El sensor 11 representó la temperatura ambiente externa como punto de comparación con la zona de prueba del álabe y el sensor 12 estableció la temperatura de salida del álabe estator de turbina y fue conforme a la disminución de temperatura ambiente asociado a la temperatura de salida del intercambiador de calor.

- *Con aire sangrado.* Teniendo los datos de salida anteriores, se activó el aire sangrado con el fin de determinar el cambio de la transferencia de calor mediante convección interna forzada. Se manifiesta durante la prueba en la Figura 24, la caída de temperatura de los sensores utilizados en la sección del álabe, representando así la refrigeración por aire sangrado mediante los ductos del álabe estator, logrando una disminución cercana a los 10°C (283K) para cada una de las zonas de análisis.



**Figura 24.** Resultados sensados de la prueba con aire sangrado

En la Tabla 4 se muestra en forma numérica los datos arrojados en el intervalo 40, que permite verificar los datos de acuerdo con los valores graficados en la Figura 23 y 24 descritos anteriormente. En la columna “diferencia” se muestra el cambio de temperatura experimental cuando se hace uso de aire sangrado como método de refrigeración en la sección del álabe.

**Tabla 4.** Datos Experimentales de cada sensor instalados en el banco

Sensor	T(°C) Sin aire de sangrado	T(°C) con aire de sangrado	Diferencia (°C)
1	58.942	51.495	7.447
2	57.507	46.777	10.730
3	61.278	52.975	8.303
4	62.952	54.712	8.240
5	60.653	52.886	7.767
6	117.673	90.173	27.500
7	57.712	45.787	11.925
8	57.588	45.747	11.841
9	56.425	36.013	20.412
10	55.073	40.573	14.500
11	20.045	19.075	0.970
12	65.519	69.736	-4.217

## 6. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta los datos obtenidos por medio del sistema de adquisición de datos en comparación con el sistema termográfico, se evidencia que la temperatura a la salida del intercambiador de calor es de aproximadamente 373,15K (100 °C), de acuerdo con los cálculos realizados para este. Otro punto importante se observa en la Figura 23, donde es posible verificar que la temperatura supera los 573K (300°C) en el sensor 6, este valor es congruente si se compara con la temperatura que es asumida durante el proceso analítico.
- El proceso de diseño y construcción se hizo conforme los parámetros establecidos para lograr el objetivo planteado desde el inicio. Es importante considerar que los sistemas se diseñaron para ser adaptados al diseño de la bancada. También es claro precisar la diferencia en los valores teóricos calculados en la parte de análisis teórico del álabe en Ansys Workbench del artículo previamente presentado. Según este análisis, la temperatura máxima alcanzada por el material es aproximadamente 373.64 K (100°C), Es claro que los datos obtenidos por el sistema de adquisición de datos son diferentes debido a que la máxima temperatura sensada es de 335.965 K (62.952°C). Se podría considerar que los datos reales varían en un 10.083%.
- Es claro que el banco de pruebas tiene la capacidad de arrojar datos reales al momento de ser inducido un flujo de calor a través de él. Así mismo, es posible forzar un flujo de aire de refrigeración por medio de los ductos del álabe para evidenciar el comportamiento que tiene este. Como se ve en la tabla 3, cuando se genera la refrigeración, hay una reducción de entre 8 °C a 10°C sensados en el material.

### Agradecimientos

A los estudiantes del programa de Ingeniería Aeronáutica de octavo semestre de la Universidad de San Buenaventura, integrantes del grupo de la asignatura Construcción de Motores 2, que hicieron posible la ejecución del proyecto. Jesús Blanco, Luisa Castillo, Bibiana Chaparro, Luz Ángela Ibarra, Andrés Ibarra, Diego Jaimes, Michael Sánchez y al profesor tutor Rafael Mauricio Cerpa.



## REFERENCIAS

- [1] Cengel, Y. & Ghajar, A. (2007). *Trasferencia de calor y masa*. McGrawHill.
- [2] Texas Instruments Incorporated (1999) LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors.
- [3] Robotshop. [Arduino Mega 2560 datasheet](#). Online [May 2018].

# Diseño preliminar de un banco de pruebas de rodaje y sistemas de frenos de aeronaves categoría FAR 23

Fabio Merchán<sup>1</sup>

Adrián Torres<sup>2</sup>

Eric Rodríguez<sup>3</sup>

Universidad de San Buenaventura  
Bogotá – Colombia

En Colombia se ha visto la necesidad de certificar componentes de aeronaves bajo normativa FAR 23 (Regulación Federal de Aviación), en este caso, para los componentes que corresponden al sistema de frenos y rodaje, diseño preliminar que se presenta en este capítulo. Con base a lo anterior, se expone la metodología de diseño planteada a partir de unos requerimientos dados por la normatividad TSO-C135 y TSO-C26 (Órdenes Técnicas Estándar). Por otra parte, se muestra el desarrollo experimental que evidencia la selección de la alternativa de diseño bajo una matriz de decisión y de cumplimiento; el proceso analítico para dimensionar elementos estructurales, uniones soldadas y acoples; la configuración del sistema hidráulico y del sistema de inercia; el modelamiento general del banco, así como su disposición; y simulaciones estructurales por elementos finitos. Como resultado del desarrollo experimental, se determinan las características y especificaciones de la estructura como su dimensionamiento, en donde su altura máxima es de 2,5058m, sus perfiles de soporte IP160 y métodos de sujeción; la disposición y los componentes del sistema hidráulico como la selección de actuadores, unidad hidráulica, selección de válvulas y diseño del circuito; volante de inercia, teniendo en cuenta energía cinética establecida en la norma, selección de rodamientos y dimensionamiento, en el cual el radio exterior es de 0,76m y el ancho es de 0,9272m; modelamiento CAD del banco, en el que las dimensiones generales del banco son 2,6822m de alto, 2,2704m de ancho y 1,9363m de largo; resultados del análisis estructural por elementos finitos, especificaciones de ergonomía y demarcación industrial.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para lograr certificar los componentes de una aeronave, como es el sistema de frenos, se debe cumplir con los requerimientos de la autoridad aeronáutica correspondiente; por tal motivo, se pretende realizar el diseño del banco de pruebas de rodaje y sistemas de frenos para aeronaves de categoría FAR 23, con base en la normatividad aeronáutica TSO.

Inicialmente se parte de un análisis preliminar de requerimientos de diseño con el propósito de plantear alternativas de solución ingenieril que cumplan con los parámetros establecidos por la normatividad aeronáutica; con base a una matriz de decisión, se selecciona la alternativa más viable para continuar con el proceso de diseño preliminar de cada sistema y componente del banco de pruebas de rodaje y sistemas de frenos junto con un análisis estructural. Cabe resaltar que este banco se diseñará para realizar pruebas estáticas para aeronaves de categoría referida en la FAA Título 14 CFR Parte 23.

En unión con la Fuerza Aérea Colombiana, en la sección de certificación SECAD (Sección de Certificación Aeronáutica de la Defensa) y la Universidad de San Buenaventura, Bogotá; a través de la Facultad de Ingeniería y el programa de Ingeniería Aeronáutica, se busca realizar el proceso de un diseño preliminar que establezca un protocolo de pruebas necesarias para el sistema de frenos y rodaje de las aeronaves correspondientes dentro de la categoría FAR 23.

## 2. MÉTODO

A partir de los estándares mínimos del TSO-C135 y de los antecedentes indagados, se plantean los requisitos específicos del banco de pruebas. Con ello, continuar con la visualización del tren de aterrizaje de una aeronave FAR 23 de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), para concretar la idea del banco de pruebas a realizar. Como paso a seguir, seleccionar el sistema de simulación de las pruebas de rodaje, así como del sistema de frenos. Se debe diseñar y dimensionar en un programa de CAD los componentes del banco a ensamblar, para posteriormente hacerles un análisis estructural, ello debe cumplir con los requerimientos de la normatividad. A partir del modelamiento del banco, se hace el análisis por elementos finitos mediante el programa ANSYS, del comportamiento de la estructura a la que se encuentra sometida en ciertas condiciones operacionales. Como resultado de lo anterior, si se cumple con los requerimientos, se arrojará unos protocolos de operación del banco [21].

## 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Desarrolla el proceso conceptual y preliminar que permite realizar un análisis del banco de pruebas del sistema de frenos y rodaje para aeronaves categoría FAR 23. Esta es una investigación sistemática que emplea los conocimientos existentes de los diferentes artículos y trabajos de investigación relacionados con el proyecto, respecto a lo anterior

---

<sup>1</sup> [fmerchan@usbog.edu.co](mailto:fmerchan@usbog.edu.co)

<sup>2</sup> [antorresl@academia.usbbog.edu.co](mailto:antorresl@academia.usbbog.edu.co)

<sup>3</sup> [esrodriguez@academia.usbbog.edu.co](mailto:esrodriguez@academia.usbbog.edu.co)

se selecciona una propuesta de diseño que integra los sistemas de inercia, hidráulico e integridad estructural para el óptimo funcionamiento del banco de pruebas. Se tiene en cuenta la seguridad del operador, ergonomía y seguridad industrial con base a las normas vigentes del ministerio de trabajo [21].

### 3.1 Matriz de requisitos de certificación y de decisión

El proceso de diseño del banco de pruebas, debe seguir los requisitos establecidos por la normatividad aeronáutica correspondiente que es la categoría FAR 23 [1]. Además, las características del banco, se guían de documentación aeronáutica como son las órdenes técnicas estándar (TSO) [2,3], circulares consultivas (AC) [4] y estándares de aeronavegabilidad (AS) [5]. Que establecen estándares de las especificaciones de los sistemas a probar en el banco, que hacen referencia a rodaje y frenos. En la siguiente Tabla 1 se observa el requisito de la normatividad y sus métodos de cumplimiento aplicados a las pruebas del banco [1].

**Tabla 1.** Matriz de Requisitos de Certificación [21]

Normatividad FAR 23	Requisito	Método de cumplimiento
23.731 (rodaje)	Capacidad de carga máxima en rodaje y centro crítico e gravedad	
23.733 (llantas)	Carga en los neumáticos y las respectivas reacciones en tierra del tren	TSO-C26, TSO-C135a,
23.735 (frenos)	Absorción de energía del sistema de frenos y la presión respecto a la distancia requerida.	AC25,735-1, AS5714

El proceso para tener un modelo de banco de pruebas apropiado resulta de cinco propuestas a evaluar, las cuales tienen configuraciones diferentes. Con esto, se plantea una matriz de decisión donde se evalúa, para cada banco, diferentes aspectos para el diseño, además se le da un puntaje que determina la aceptabilidad del banco. A cada propuesta se la hace una observación respecto a cada ítem donde se plasman las ventajas o desventajas que definen el puntaje. En la Tabla 2 se observa las cinco propuestas en la matriz decisión [21].

**Tabla 2.** Matriz de Decisión [21]

Propuestas	(%)					
Ergonomía	12%	9	7	8	7	8
Automatización	8%	6	8	8	7	8
Dimensionamiento	13%	7	9	9	9	9
Economía	8%	8	7	7	7	9
Materiales	12%	8	8	7	7	9
Construcción	15%	8	7	8	7	8
Elemento Estructural	17%	7	7	8	8	9
Seguridad industrial	15%	9	8	8	8	8
Total	100%	7,81	7,61	7,93	7,58	8,5

### 3.2 Estructura del banco de pruebas

Las uniones soldadas serán uno de los métodos de sujeción a emplear en la estructura del banco de pruebas. El proceso de selección de la junta de soldadura depende del ángulo entre superficies. En este proceso se empleará soldadura tipo filete, con ciertas especificaciones del cordón de soldadura respecto a la carga a soportar ( $Fr$ ), al coeficiente de correlación del material ASTM A500 ( $\beta_w$ ), al coeficiente de seguridad para uniones soldadas ( $\gamma_{mv}$ ) y al esfuerzo de fluencia del material base que es de  $f_y$  [10]. Como se analiza en la ecuación (1) [6]. Luego determinar el área ( $a$ ) del cordón de soldadura en la ecuación (2) [6].

$$f_{vwd} = \frac{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\beta_w \cdot \gamma_{mv}} = \frac{\left(\frac{320 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}\right)}{0,85 \cdot 1,25} = 173,84 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$a = \frac{f_{vwd}}{Fr} = \frac{173,48 \times 10^6 \text{ N/m}^2}{78480 \text{ N}} = 451,345 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (2)$$

Se procede a establecer el espesor del cordón mínimo requerido ( $h$ ), con base a la longitud de un lado de la sección transversal de la viga de acero ( $l$ ). Como indica la ecuación (3) [6].

$$h = \frac{a}{l} = \frac{451,345 \times 10^{-6} \text{ m}^2}{0,1 \text{ m}} = 4,513 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (3)$$

Para la unión de cada viga de la estructura se empleará la configuración de cordones de soldadura por todos los lados de la sección transversal. Con base a esto es necesario determinar la inercia ( $I_{viga}$ ) en la ecuación (4) y el respectivo modulo resistente ( $W$ ). Como indica la ecuación (5) [6].

$$I_{viga} = \frac{l^2}{6} (3 * l + l) = \frac{0,1^2}{6} (3 * 0,1 \text{ m} + 0,1 \text{ m}) = 6,666 \times 10^{-4} \text{ m}^4 \quad (4)$$

$$W = \frac{I}{\frac{l}{2} + \frac{h}{2}} = \frac{6,666 \times 10^{-4}}{\frac{0,1}{2} + \frac{4,513 \times 10^{-3}}{2}} = 0,01275 \text{ m} \quad (5)$$

Respecto a los datos anteriores se determina el esfuerzo normal ( $\sigma_{normal,V}$ ) de los cordones de soldadura, en la ecuación (8). Debido a las tensiones ( $n$ ) en la ecuación (6) y a las tensiones longitudinales ( $tn$ ) en la ecuación (7) [6].

$$n = \frac{Fr \cdot l_1}{W} * \frac{l}{l+h} = \frac{78480N \cdot 1,952m}{0,01275m} * \frac{0,1m}{0,1m + 4,513 \times 10^{-3}m} = 11,49 MPa \quad (6)$$

$$tn = \frac{Fr}{2 \cdot h \cdot l} = \frac{78480N}{2 \cdot 4,513 \times 10^{-3}m \cdot 0,1m} = 86,948 MPa \quad (7)$$

$$\sigma_{normal,V} = \frac{n+tn}{\sqrt{2}} = \frac{11,49 MPa + 86,948 MPa}{\sqrt{2}} = 69,60 MPa \quad (8)$$

Los tornillos de sujeción son el método para unir el acople con el volante de inercia, para esto se seleccionaron 4 tornillos Grado SAE 8. La fuerza de aplicación de carga y peso del volante, respectivamente en la ecuación (9) [21], es:

$$F = (8000kg + 4000 kg)9,81 \frac{m}{s^2} = 117720 N \quad (9)$$

La resistencia de prueba mínima para este tornillo es  $\sigma = 827,3709 MPa$  y el área de esfuerzo de tensión es  $A_t = \frac{F}{0,75 \sigma} = 0,1897 * 10^{-3} m^2$ . Con esto, el área de esfuerzo de tensión de una rosca unificada de tornillo de Seria fina-UNF es  $A_t = 0,2406 * 10^{-3} m^2$  y su designación de tamaño o diámetro nominal es  $d = 0,0191m$  ( $d = \frac{3}{4}$  pulg) [6].

### 3.3 Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico del banco de pruebas requiere una unidad hidráulica que envíe un flujo de aceite a tres sistemas que hacen referencia al sistema de frenos de la aeronave, al sistema de aproximación de la rueda de fricción y al sistema de aplicación de carga para la respectiva prueba [7]. Es necesario seleccionar el actuador a emplear para el sistema de aplicación de carga, este actuador hidráulico debe tener una capacidad de carga mayor a 8 toneladas, debido a los requerimientos de la norma para pruebas en aeronaves categoría FAR 23. Con base en lo anterior en la Tabla 3 se encuentran las dimensiones del actuador seleccionado [8]. Donde se determina la presión requerida ( $P_{h1}$ ) en la ecuación (10), el caudal ( $Q_{h1}$ ) en la ecuación (11) y la velocidad ( $v_{h1}$ ) en la ecuación (12); para un tiempo de operación de 60 segundos [7].

**Tabla 3.** Actuador hidráulico RCH-123 [8]

Dimensiones del actuador hidráulico	En metros
Diámetro del pistón ( $\emptyset_{pistón}$ )	0,054102
Diámetro del vástago ( $\emptyset_{vast}$ )	0,035052
Carrera del pistón (carrera)	0,0762
Área del pistón ( $A_{pistón}$ )	0,00229 $m^2$

$$P_{h1} = \frac{W_{avion}}{A_{pistón}} = \frac{78480 N}{0,00229 m^2} = 34,138 MPa \quad (10)$$

$$v_{h1} = \frac{carrera}{t_1} = \frac{0,0762 m}{60 seg} = 0,00127 \frac{m}{s} \quad (11)$$

$$Q_{h1} = \frac{A_{pistón}}{v_{h1}} = \frac{0,00229 m^2}{0,00127 \frac{m}{s}} = 2,91958 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} \quad (12)$$

El sistema de acercamiento del motor que hace girar la rueda de fricción, debe incorporar un actuador hidráulico. Este dispositivo debe ejercer una carga cercana a 500 kg debido a que su operación es desplazar el motor eléctrico, la carcasa del motor y la rueda de fricción. En la Tabla 4 se encuentran las dimensiones del actuador seleccionado [8]. De modo que para un tiempo de operación de 60 segundos se determine la presión ( $P_{h2}$ ) en la ecuación (13), el caudal ( $Q_{h2}$ ) en la ecuación (14) y la velocidad del actuador ( $v_{h2}$ ) en la ecuación (15) [7].

**Tabla 4.** Actuador hidráulico RC-55 [8]

Dimensiones del actuador hidráulico	En metros
Diámetro del pistón ( $\emptyset_{pistón2}$ )	0,0287
Diámetro del vástago ( $\emptyset_{vast2}$ )	0,0254
Carrera del pistón (carrera2)	0,127
Área del pistón ( $A_{pistón2}$ )	0,000646 $m^2$

$$P_{h2} = \frac{W_{motor}}{A_{pistón2}} = \frac{4905 N}{0,000646 m^2} = 7,582 MPa \quad (13)$$

$$v_{h2} = \frac{carrera2}{t_2} = \frac{0,127 m}{60 seg} = 0,002116 \frac{m}{s} \quad (14)$$

$$Q_{h2} = \frac{A_{pistón2}}{v_{h2}} = \frac{0,000646 m^2}{0,002116 \frac{m}{s}} = 1,36932 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} \quad (15)$$

Para el sistema de frenos de la aeronave, cada aeronave especifica en su manual la presión requerida para la operación del freno. Para el caso del CASA 212 su presión es de 7,86 MPa. Con base en las especificaciones de cada sistema hidráulico y del aceite con densidad ( $\rho_f$ ) se determina la potencia ( $\dot{P}$ ) requerida por la bomba para el desplazamiento del fluido al punto más alto del banco ( $H_h$ ), como indica la ecuación (16) [7].

$$\dot{P} = \frac{P_{h1} \cdot Q_{h1}}{60} + \frac{P_{h2} \cdot Q_{h2}}{60} \quad (16)$$

$$\dot{P} = \frac{34,138 \text{ MPa} * 0,17517 \frac{L}{\text{min}}}{60} + \frac{7,582 \text{ MPa} * 0,08215 \frac{L}{\text{min}}}{60} = 0,110 \text{ Kw} \approx 0,149 \text{ HP}$$

### 3.4 Sistema de Inercia

El volante de inercia es un cilindro rodante, que, por su naturaleza, almacena la energía cinética necesaria para mover otro elemento. Según la normatividad FAR 23, las aeronaves de esta categoría durante el contacto con la pista llevan cierta energía cinética ( $Ke_{FAR}$ ) determinada por la siguiente ecuación (17), donde ( $v_{avion}$ ) es la velocidad de la aeronave, ( $W_{avion}$ ) peso de la aeronave y ( $N_{llanta}$ ) es el número de llantas que para las pruebas en el banco será de 1 [1].

$$e_{FAR} = 0,0443 \frac{W_{avion} + v_{avion}}{N_{llanta}} = 0,0443 \frac{8000 \text{ kg} + 62 \frac{m}{s}}{1} = 1362313,6 \text{ J} \quad (17)$$

Se determina el radio exterior e interior del volante de inercia como se indican en la tabla 5. Con base en los documentos guía, se establece una relación del ancho respecto al radio de 1,22. El material del volante es SAE 4340 que hace referencia a un acero de estructural con una densidad  $\rho_{SAE4340}$  y una resistencia a la tracción  $\sigma_{tSAE4340}$  [11]. Posteriormente se calcula el peso específico (Pe) en la ecuación (18), el volumen (V) en la ecuación (19), la respectiva masa del volante ( $m_{volante}$ ) en la ecuación (20) y el momento de inercia ( $I_{volante}$ ) en la ecuación (21) [9].

**Tabla 5.** Dimensionamiento del volante de inercia [9]

Dimensiones del volante de inercia	En metros
Radio exterior del volante (Rext)	0,76
Radio interior del volante (Rint)	0,74
Ancho del volante (h)	0,9272

$$Pe = \rho_{SAE4340} * g = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 77008,5 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \quad (18)$$

$$V = \pi * h * (R_{ext}^2 - R_{int}^2) = \pi * 1 * (0,95^2 - 0,93^2) = 0,0873 \text{ m}^3 \quad (19)$$

$$m_{volante} = V * Pe = 6729,506 \text{ N} / 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 685,9843 \text{ kg} \quad (20)$$

$$I_{volante} = \frac{1}{2} * m * (R_{ext}^2 + R_{int}^2) = \frac{1}{2} * 685,984 \text{ kg} * (0,76^2 \text{ m} + 0,74^2 \text{ m}) = 385,935 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (21)$$

Con respecto al dimensionamiento, peso del volante y a la velocidad de la aeronave a probar. Se requiere determinar la energía cinética ( $Ke_{volante}$ ) indicada en la ecuación (22) [9].

$$Ke_{volante} = \frac{m_{volante} * (v_{avion})^2}{2 * g} = \frac{6729,506 \text{ N} + 62 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1318461,918 \text{ J} \quad (22)$$

Luego de analizar las especificaciones del volante de inercia, se debe establecer su condición de operación. Una de estas condiciones es la tensión centrífuga, donde se determina la velocidad de rotura del volante ( $Vr_{volante}$ ) en la ecuación (23). Se debe tener en cuenta que los volantes de inercia se diseñan con un factor de seguridad (F.S) de 10 y con base en estos datos se establece la velocidad de seguridad máxima lineal ( $VS_{lineal}$ ) como indica la ecuación (24) [9].

$$Vr_{volante} = \sqrt{\frac{\sigma_{tSAE4340}}{0,0146 * 4,333 + \left(\frac{R_{int}}{R_{ext}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{6498}{0,0146 * 4,333 + \left(\frac{0,74}{0,76}\right)^2}} = 290,30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (23)$$

$$VS_{lineal \text{ max.}} = \frac{F.S}{\sqrt{Vr_{volante}}} = \frac{10}{\sqrt{290,30 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} = 91,80 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ ó } 18066,77 \frac{\text{ft}}{\text{min}} \quad (24)$$

Con base en la velocidad de seguridad lineal, se determina la velocidad de máxima de rotación ( $\omega_{max.}$ ) en la ecuación (25) con base al diámetro del volante [9].

$$\omega_{max.} = \frac{(2 * R_{ext}) * 3,28}{\pi * VS_{lineal}} = \frac{4,9856 \text{ ft}}{\pi * 18066,77 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 1153,488 \text{ rpm} \quad (25)$$

Posteriormente, se determina la velocidad de operación segura de trabajo ( $\omega_{opera}$ ) en la ecuación (26). Donde el factor (C) es igual a 1 para volantes movidos por una rueda de fricción, el factor (A) es igual a 1 para un volante con 6 brazos o radios, el factor (M) es igual a 2,75 debido a la alta resistencia a la tracción del SAE 4340, el factor (E) es de 1 para las uniones de los radios al volante por soldadura, el factor (K) de 1650 debido a que el espesor hace referencia al 2% del diámetro del volante y (D) hace referencia al diámetro del volante en metros [9].

$$\omega_{opera} = 0,3 * \frac{C * A * M * E * K}{D} = 0,3 * \frac{1 * 1 * 2,75 * 1 * 1650}{1,52 \text{ m}} = 895,55 \text{ rpm} \quad (26)$$

La velocidad angular de prueba ( $\omega_{prueba}$ ) en la ecuación (27), se determina respecto a la aeronave a probar en el banco. Este valor se establece con la velocidad lineal de la aeronave y el dimensionamiento del volante, para el proyecto se usa ( $v_{avion}$ ) [9].

$$\omega_{prueba} = \frac{v_{avion}}{\frac{(R_{ext} + R_{int})}{2}} = \frac{62 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\frac{(0,76 + 0,74)}{2}} = 46,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \text{ ó } 444,04 \text{ rpm} \quad (27)$$

Existen diferentes configuraciones de volantes con radios o macizos. En el caso del proyecto el volante es con radios, el número de radios ( $N_{radios}$ ) depende del espesor de la lámina del volante ( $t_{volante}$ ), del diámetro del volante ( $D$ ) y de la velocidad de lineal de la aeronave ( $v_{avion}$ ) como inicia la ecuación (28) [9].

$$N_{radios} = \sqrt{\frac{0,02 \cdot D}{t_{volante}}} = \sqrt{\frac{0,02 \cdot 1,52}{\left(\frac{560}{v_{avion}}\right) - \left(\frac{1}{10}\right)}} = 5,768 \approx 6 \quad (28)$$

La sección transversal de cada radio se determina respecto a la carga crítica de pandeo ( $P_{cr}$ ) en la ecuación (29), que se puede presentar por la aproximación de la llanta al volante durante la prueba. Esta carga se determina para un factor de seguridad ( $F.S$ ) de 5 recomendado por la bibliografía guía, Y el  $W_{avion}$  máximo de 8 toneladas que por seguridad, junto al peso de los componentes se establece de 9 toneladas [9].

$$P_{cr} = F.S * W_{avion+componentes} = 5 * 88290 N = 441450 N \quad (29)$$

Debido a que el material de cada radio del volante es acero ASTM A500 en configuración rectangular con un módulo de elasticidad ( $E_{A500}$ ) y un esfuerzo de fluencia ( $Sy_{A500}$ ). Se debe tener en cuenta que un extremo del radio esta empotrado al eje del volante, esto equivale a una constante de condición final ( $C$ ) es igual a 1. También se debe tener en cuenta la longitud del radio ( $L_{radio}$ ) es de 0,64 m y un valor de referencia de la sección transversal ( $h_{ref}$ ) que es de 0,1 m. Con base en lo anterior en la ecuación (30), se determina la dimensión de la sección transversal ( $b$ ) [9,10].

$$b = \frac{P_{cr}}{h_{ref} * Sy_{A500} * \left(\frac{3 * L^2 * Sy}{\pi^2 * C * E_{A500} * h_{ref}^2}\right)} \quad (30)$$

$$b = \frac{441450 N}{0,1 m * \left(32,63 * 10^6 \frac{kg}{m^2}\right) * \left(\frac{3 * 0,64^2 m^2 * (32,63 * 10^6 \frac{kg}{m^2})}{\pi^2 * 1 * (2,039 * 10^{10} \frac{kg}{m^2}) * 0,1 m^2}\right)} = 0,138035565 m$$

Para el análisis y selección de un rodamiento es necesario conocer la carga radial del sistema y con base en ella, se determina la carga equivalente ( $P_{equi}$ ) en la ecuación (31) para el rodamiento, teniendo en cuenta que el factor de rotación interno es ( $V_{factor,r}$ ) es igual a 1 debido a que girará solo la pista interna del rodamiento. Con una carga radial ( $Fr$ ) que hace referencia a la fuerza normal del sistema de inercia [12].

$$P_{equi} = V_{factor,r} * Fr = 1 * 91289,89 N = 91289,89 N \quad (31)$$

La capacidad de carga dinámica ( $Cr$ ) en el rodamiento se establece mediante la carga equivalente ( $P_{equi}$ ) como indica la ecuación (33). Donde la vida útil ( $L_{10}$ ), las revoluciones ( $n$ ) a las que se encuentra sometido el volante se establecen en el factor de la ecuación (32) y junto a una constante  $k=3,33$ . Se determina el valor de carga dinámica para la selección del rodillo [12].

$$L_d = L_{10} * n * 60 = 11500 h * 558 rpm * 60 \frac{min}{h} = 385.02 * 10^6 \quad (32)$$

$$Cr = P_{equi} \left(\frac{L_d}{10^6}\right)^{\frac{1}{k}} = 91289,89 \left(\frac{385.02 * 10^6}{10^6}\right)^{\frac{1}{3,33}} = 545561.974 N \quad (33)$$

La vida útil ( $L_{10}$ ) especifica la duración del rodamiento según su operación. Para este caso se establece un valor promedio de 11500 horas debido a que su aplicación de transmisión es de uso múltiple [12]. Se requiere implementar un sistema de rueda de fricción para transmisión de potencia, de modo que este se encargue de hacer girar el volante de inercia. Con base en las especificaciones del volante se determina las rpm de la rueda de fricción (ecuación (34)) que tiene un diámetro promedio de 0,3 m [9].

$$W_{rueda,motor} = \frac{\phi_{volante} * W_{opera,volante}}{\phi_{rueda}} = \frac{1,52 m * 895,55 rpm}{0,3 m} = 4537,45 rpm \quad (34)$$

Respecto a las rpm de la rueda de fricción, se establece la potencia requerida por el motor ( $CV$ ) en la ecuación (35). Donde el ángulo de contacto de la llanta con el volante es de  $90^\circ$  con un coeficiente de fricción caucho-concreto ( $f$ ) de 0,8. La rueda tiene un ancho ( $L_{ancho,cara}$ ) de 12 cm y para 5kg de carga la presión aplicada en el contacto de la rueda con el volante ( $P_{aplicada}$ ) es de  $0,417 \frac{kg}{cm^2}$  [9].

$$CV = \frac{3,1416 * \phi_{rueda} * N * P_{aplicada} * L_{ancho,cara} * f}{4500} \quad (35)$$

$$CV = \frac{3,1416 * 4537,45 * 0,3 * 0,417 * 12 * 0,8}{4500} = 3,8 CV \approx 3,74 HP$$

Posteriormente de determinar la potencia del motor y las revoluciones. Se establece el par motor ( $M$ ) en la ecuación (36). Con base en el par motor y al momento polar de inercia del eje ( $I_{eje}$ ) que une la llanta al motor en la ecuación (37), se determina el esfuerzo córtate máximo ( $\tau_{max}$ ) como indica la ecuación (38). El radio del eje es cercano a 2,5 cm en referencia a los catálogos [9].

$$M = \frac{CV}{W_{rueda,motor}} = \frac{3,74 HP * \frac{745,7 watt}{1 HP}}{4537,45 rpm * \frac{1}{60}} = 5,884 \frac{N}{m} \quad (36)$$

$$I_{eje} = \frac{1}{2} * \pi * (R_{eje})^4 = \frac{1}{2} * \pi * (0,025 \text{ m})^4 = 6,13592x10^{-7}m^4 \quad (37)$$

$$38) \tau_{max} = \frac{M * R_{eje}}{I_{eje}} = \frac{5,884 * 0,025}{6,13592x10^{-7}} = 0,239 \text{ MPa} \quad (38)$$

### 3.5 Modelamiento CAD del banco de pruebas

A partir de la matriz de decisión de la Tabla 2 se llegó al banco de pruebas, modelado en CATIA, que se muestra en la Figura 1 [16]. Este tiene elementos diseñados a partir de cálculos realizados, dimensiones industriales y magnitudes tomadas. El ensamble CAD del banco de pruebas se compone de partes (unidades) y componentes (conjuntos) [21].

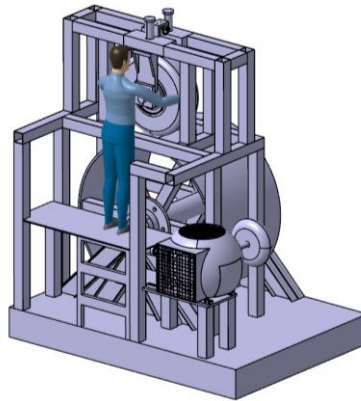


Figura 1. Diseño del banco de pruebas [21]

### 3.6 Simulación por elementos finitos

Se importa la geometría en CAD de la estructura del banco de pruebas con sus respectivas uniones soldadas. En el software de simulación ANSYS en su extensión Workbench. Donde se ingresa las propiedades mecánicas del material A500 [10] para el perfil estructural y el material E7024 [13] de la soldadura. Se realiza el proceso de mallado para la estructura obteniendo una cantidad de 84040 nodos y 17736 elementos [14]. Se ingresan las cargas presentes durante la prueba en los puntos específicos de la estructura y los respectivos soportes fijos. Las cargas presentes hacen referencia a una carga de reacción superior de 8 toneladas, en la sección media donde está el operador se ubica una carga de 100 kg y en la sección inferior donde se ubica el motor se aplica una carga de 500 kg [14]. Como se representa en la siguiente Figura 2.

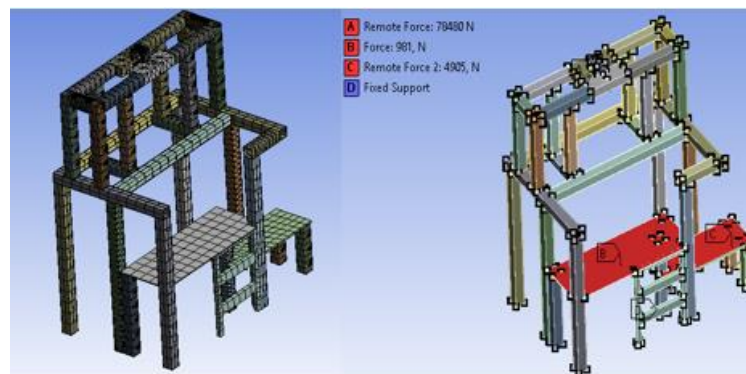


Figura 2. Proceso de mallado y cargas en la estructura del banco [21]

Para el volante de inercia también se importa la geometría en CAD a ANSYS. Donde se ingresa las propiedades mecánicas del material del volante SAE 4340 [11]. Se realiza el proceso de mallado para el volante obteniendo una cantidad de 14545 nodos y 7269 elementos [14]. Se ingresa la carga perpendicular a la superficie que hace referencia al contacto de la llanta de la aeronave de 8 toneladas como carga máxima de la prueba [14]. Como indica la Figura 3.

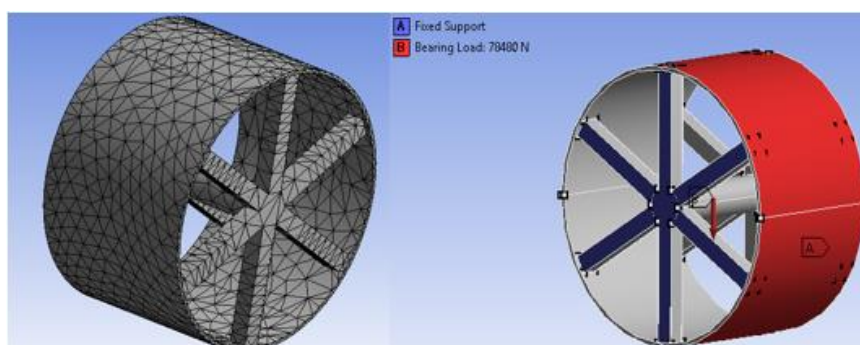


Figura 3. Proceso de mallado y ubicación de la carga en el volante [21]

El diseño de la configuración del soporte del volante de inercia se importa en un archivo CAD a ANSYS; este soporte es del mismo material de la estructura del banco. Se realiza el proceso de mallado donde se obtuvo una cantidad de 39579 nodos y 12900 elementos. Se implementan las cargas a la estructura del soporte del volante, de modo que se determina la reacción en los dos soportes respecto a las 8 toneladas de la prueba y un peso del volante de 685 kg [14]. Como indica la Figura 4.

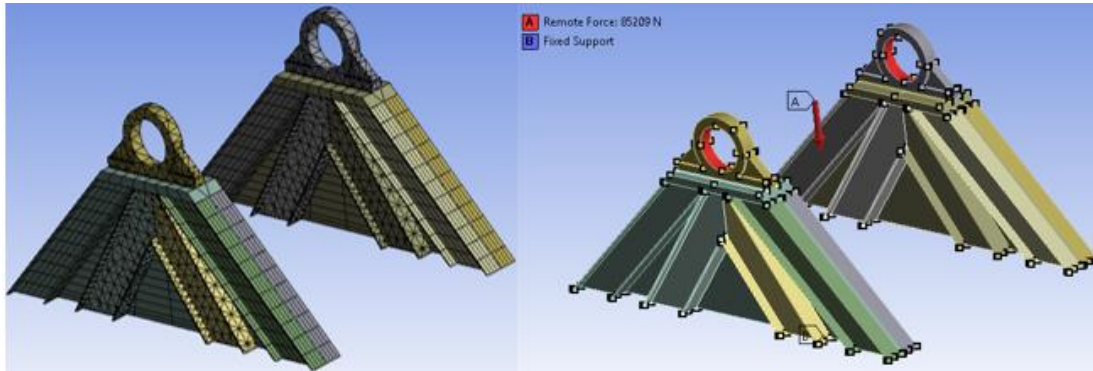


Figura 4. Proceso de mallado y carga del soporte del volante [21]

### 3.7 Análisis ergonómico y demarcación

Para un análisis ergonómico se requiere determinar, la posición de levantamiento de carga esta debe seguir ciertos factores. Como la separación que debe haber entre la sujeción del elemento y la distancia de los tobillos del operador (HM) en la ecuación (39), que relaciona la distancia del estándar de 25 cm con la distancia real del elemento respecto al torso del operador (H). La distancia promedio del punto de agarre del objeto al suelo que representa el factor (VM) en la ecuación (40). Respecto a una distancia vertical de la carga (V) [15].

$$HM = \frac{25 \text{ cm}}{H} = \frac{25 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} = 1 \quad (39)$$

$$VM = (1 - 0,003 (V - 75)) = (1 - 0,003 (75 \text{ cm} - 75 \text{ cm})) = 1 \quad (40)$$

Respecto a que el peso máximo del elemento a cargar por un operador es de 23 kg (LC). La manipulación de la carga será al menos de 1 vez por cada ciclo de operación del banco, debido a que solo se realizará cuando se monte o se desmonte la llanta de la respectiva aeronave. Con base a lo anterior se determina un factor de frecuencia 0,94 (FM). Para este caso el elemento es una llanta y su tipo de agarre es considerado regular es decir no posee medios de agarre, según la bibliografía guía su factor de agarre es de 0,95 (CM). También se debe tener en cuenta el factor de asimetría que indica la torsión del tronco del operador, para un ángulo máximo de 135° se determina un factor de asimetría (AM) como indica la ecuación (41) [15].

$$AM = 1 - (0,0032 * \text{Angulo}) = 1 - (0,0032 * 135^\circ) = 0,568 \quad (41)$$

Con base a los factores anteriores se logra determinar mediante la ecuación (42) el peso recomendado máximo a cargar por el operador (RWL) [15].

$$RWL = LC * HM * VM * AM * FM * CM = 23 \text{ kg} * 1 * 1 * 0,56 * 0,94 * 0,95 = 11,50 \text{ kg} \quad (42)$$

Se requiere determinar las especificaciones, que se deben tener en cuenta para la implementación de la demarcación y sus respectivos colores. Con base a esto cada elemento y sistema del banco de pruebas respecto a su operación debe estar categorizado en el código de colores exigido por el ministerio de trabajo de la república de Colombia. En la siguiente Tabla 6 se observa la clasificación de los componentes respecto a los colores [16].

Tabla 6. Código de colores para los componentes del banco de pruebas [16]

Componentes y sistemas del banco	color
Elementos y equipos de protección contra el fuego	rojo
equipos de seguridad y primeros auxilios	verde
Sistema hidráulico, fuentes de poder y prevención	azul
área de trabajo, estructura y plataformas	amarillo
Volante de inercia y elementos de rotación	Gris plata

## 4. RESULTADOS

Respecto al análisis de resultados del desarrollo experimental, en primera instancia se determina la configuración del banco de pruebas con base a una matriz de decisión y los requisitos de certificación, con ello se llega a la estructura donde la configuración rectangular de la viga y las especificaciones del acero ASTM A500; establecen la disposición del banco respecto a los esfuerzos presentes en la operación y la capacidad máxima a soportar de 8 toneladas. Además, se especifica el análisis de cada sistema presente en el banco de pruebas y sus características de operación, como es el sistema de inercia que se encarga de aportar la energía necesaria para realizar la prueba, el sistema hidráulico que tiene como función la aplicación de carga y desplazamiento de componentes y las características de ergonomía del



banco establecidas por el ministerio de trabajo. Respecto a lo anterior el proyecto tiene como finalidad, unir y complementar diferentes conceptos de modo de obtener un producto netamente colombiano que aporte a la investigación de la industria aeronáutica colombiana.

#### 4.1 Características de la estructura

La altura máxima de la estructura es de 2,5058m. Las vigas de la estructura tienen un perfil cuadrado estándar de industria IP160. En la Figura 5 se muestra las medidas de este perfil. El material de estas vigas es acero A500. [10]

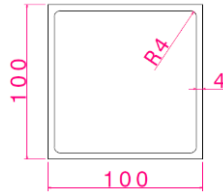


Figura 5. Dimensiones del perfil estructural [21]

La soldadura a emplear en el banco de pruebas es SMAW debido a su equipo simple, portátil y de bajo costo. Esta soldadura permite su uso en diferentes posiciones a soldar y es muy usada en aplicaciones exteriores. Además, los catálogos recomiendan este tipo de soldadura para el acero A500 a emplear en la estructura. La selección del tipo de electrodo depende de la resistencia a la tracción, de su posición ideal para soldar, del tipo de recubrimiento, de la corriente si es continua o alterna, la polaridad, la penetración y la escoria [13].

Respecto a las propiedades del material base acero A500 se establece que no posee una alta concentración de carbono y al no ser tan ancho el espesor de la viga, no es necesario un electrodo de ductilidad máxima. Por lo anterior se determina que la categoría más apropiada son electrodos E60xx y E70xx. De este modo se empleará el electrodo E7024 que tiene propiedades mecánicas por encima del ASTM A500 como es su esfuerzo último y de fluencia. Además, usa corriente alterna y el amperaje de esta permite desarrollar el cordón de soldadura en el espesor de la viga sin generar daños estructurales. El diámetro del electrodo es de 4.76 mm muy cercano al espesor del cordón mínimo requerido que es de 4,513 mm [13]. Los tornillos tienen unas dimensiones que se designan en la Figura 6, sus cálculos se muestran a continuación.

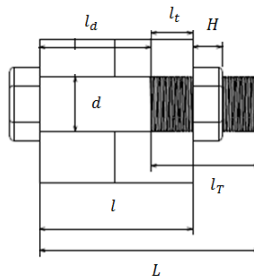


Figura 6. Dimensiones del tornillo [21]

La longitud roscada es  $L_T = 2d + \frac{1}{2} = 0,0508m$ , para  $L > 0,1524m$ , la altura es  $H = 0,0119m$  y  $l = 0,3962m$ , así, la longitud del sujetador es  $L > l + H = 0,0779m$ , el tamaño preferido es  $L = 0,3556m$  [6]. La longitud de la parte útil sin rosca es  $l_d = L - L_T = 0,2811m$  y la longitud de la parte rosca es  $l_t = l - l_d = 0,0389m$ [6]. El área de la parte sin rosca es  $A_d = \pi \frac{d^2}{4} = 0,2850 * 10^{-3}m^2$  y el área de la parte rosca para la Serie fina-UNF es  $A_t = 0,2406 * 10^{-3}m^2$  [6]. El material usado para los tornillos es acero de aleación de medio carbono T y R con un módulo de elasticidad de  $E = 207 GPa$ , así la rigidez del sujetador se determina en la ecuación (43) [6].

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} = 18020108,02 \frac{N}{m} \quad (43)$$

La relación del resorte en la zona de sujeción de la parte rosca es  $k_t = \frac{A_t E}{l_t} = 127978355,9 \frac{N}{m}$  y en la parte sin rosca es  $k_d = \frac{A_d E}{l_d} = 20973267,95 \frac{N}{m}$  [6]. El diámetro nominal exterior de la rosca es  $D = 0,0191m$ , la carga aplicada es  $P = 117720N$  y la constante de la lubricación presente para las roscas limpias y secas es  $K = 0,20$ . Así, se ejerce un par torsional de apriete sobre la tuerca o sobre la cabeza del tornillo de  $T = KDP = 448,5132Nm$  [6].

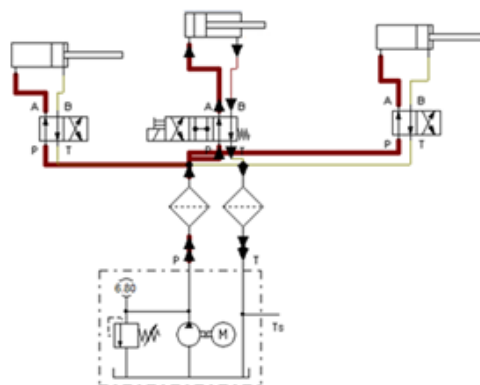
#### 4.2 Componentes del sistema hidráulico

Respecto a las especificaciones establecidas de cada componente hidráulico se establece la unidad hidráulica requerida para la operación del actuador de carga, del actuador de aproximación de la rueda de fricción y del freno de disco de la llanta de la aeronave. Debido a que se requiere una presión total de los tres sistemas de 49,58 Mpa o 7191,03 psi. Con base en lo anterior se debe consultar los respectivos catálogos de unidades hidráulicas como la empresa PRAYCO con un modelo UG-H-25. Esta unidad hidráulica soporta una presión de 10000 psi con una potencia de 1 HP y sus dimensiones se encuentran en la Tabla 7 [17].

**Tabla 7.** Dimensionamiento del reservorio de la unidad hidráulica

Dimensiones del reservorio	En metros
Alto del reservorio	0,335
Ancho del reservorio	0,26
Largo del reservorio	0,53
Cantidad de aceite hidráulico en reservorio	24 litros

De lo anterior se establece que la unidad hidráulica es capaz de proporcionar el fluido y la presión necesaria a los anteriores componentes; de modo que solo con esa unidad hidráulica el banco de pruebas de sistema de frenos y rodaje puede realizar su correcta operación. Se realizó la respectiva simulación de los tres sistemas en FluidSim-H como indica la siguiente figura 7 de modo que se logre observar el comportamiento del sistema hidráulico general del banco [18].



**Figura 7.** Simulación del sistema hidráulico en FluidSim - H [21]

### 4.3 Componentes del sistema de inercia

El diseño del volante de inercia depende la energía cinética que este almacene durante la operación. Respecto a la matriz de requisitos de certificación para aeronaves de categoría FAR 23 se exige un valor de energía cinética dependiendo a ciertas especificaciones de la aeronave. En el inciso 3.4 se determina las dimensiones que debe tener el volante para que se cumpla con lo exigido en la normatividad [1]. Así mismo se determinan las condiciones máximas de operación del volante para evitar falla estructural [9]. Cada dato se analizó para una condición de operación máxima, esta condición de prueba hace referencia al conjunto llanta-freno de la aeronave más grande de la FAC, que es el CASA 212 y cumple con la categoría FAR-23 [1]. Posteriormente se determina el número de radios requeridos en el volante que son 6 [9]. De configuración perfil estructural tubular rectangular de 100mm x 100 mm que se selecciona mediante el uso de catálogos de la empresa colmena para acero ASTM A500 [10].

Durante la operación del banco de pruebas, al volante de inercia se le aplica una carga externa debido a la aproximación de la llanta de la aeronave. De modo que se llega a presentar cargas axiales y radiales. Con base en lo anterior se requiere el uso de dos configuraciones de rodamientos cónicos y cilíndricos. Mediante el uso de catálogos de rodamientos de la empresa SKF con sucursal en Colombia, se establece que el rodamiento de rodillos cilíndrico NUP 240 ECM y el rodamiento de rodillo cónico 32040-X [19]. Cumplen con el dimensionamiento del eje de 200 mm y la capacidad de carga dinámica ( $C_r$ ) es superior a la requerida [12]. Para la rotación del volante de inercia, se requiere una rueda de fricción que le transmita la potencia necesaria. La rueda de fricción debe estar acoplada a un motor eléctrico que debe cumplir con las especificaciones de velocidad angular y potencia necesarias antes calculadas en el inciso 3.4. Con base en estos datos se establece que para la operación máxima del volante  $\omega_{opera}$  se requiere un motor eléctrico de 4500 rpm y de 4 HP. Pero en cuanto al  $\omega_{prueba}$  de la aeronave CASA 212 se requiere un motor eléctrico de 2500 rpm y de 2 HP. [9].

### 4.4 Diseño en CAD

El suelo es la base del banco. La estructura está compuesta por vigas, a la cual se le unen todas las demás secciones. El volante se une a unos soportes triangulares, ajustados al suelo, por medio de un acople, el cual tiene tornillos de sujeción. El mecanismo que soporta y limita los grados de libertad de la llanta de prueba, es un componente que tiene tubos, soportes y vigas. Los actuadores son unos componentes estándar de industria. En la parte superior está el diseño del soporte del actuador, compuesto acoples y elementos de sujeción. En la parte inferior está el diseño de la carcasa que cubre el motor, posee unos rodamientos, y se ubica sobre unos rieles, dentro se ubica el motor de potencia [20].

Por ergonomía, el CAD tiene un maniquí que simula al operario, este tiene la estatura promedio del hombre colombiano y está ajustado a la llanta de la aeronave montada y sus dimensiones. Otros elementos son: el motor de potencia, la rueda de aplicación de potencia, el suelo donde se ubica el operario, la escalera, la platina de soporte del motor, los rieles y los rodamientos de industria, los ejes, los pines y las chumaceras. Adicionalmente, se le hizo el diseño de los cordones de soldadura que unen las vigas. Para su ubicación, las dimensiones máximas del banco son: de alto 2,6821m, de ancho 2,2704m y de largo 1,9363m [20].

#### 4.5 Análisis por elementos finitos

Se determina respecto a las cargas máximas estructurales presentes en el banco, los esfuerzos y deformación a los que estará sometida la estructura durante las pruebas. Se determina en la Figura 8 los concentradores de esfuerzos de la estructura, donde se observa que el esfuerzo máximo es de 296,62 MPa [21,14].

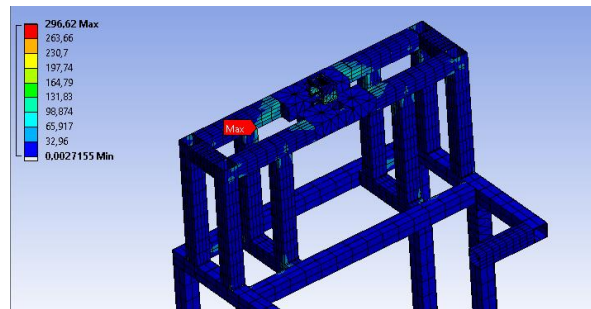


Figura 8. Esfuerzos de tensión presente en la estructura del banco [21]

Junto al esfuerzo se establece la deformación en la Figura 9, de los elementos estructurales respecto a las cargas aplicadas [21]. De modo que se analicen los puntos donde hay mayor deformación y que esta no afecte la integridad de la estructura. La deformación máxima es de 1,1067 mm y se presenta en la sección donde se encuentra sujeto el actuador hidráulico [14].

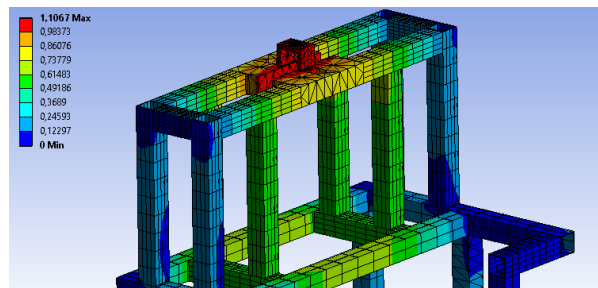


Figura 9. Deformación presente en la estructura del banco [21]

Se realiza un análisis de factor de seguridad en la Figura 10 [21], para determinar si la estructura es apta para soportar las cargas presentes durante la prueba y no se genere un accidente. Se establece que la estructura cuenta con un factor mínimo de seguridad 1,07 [14].

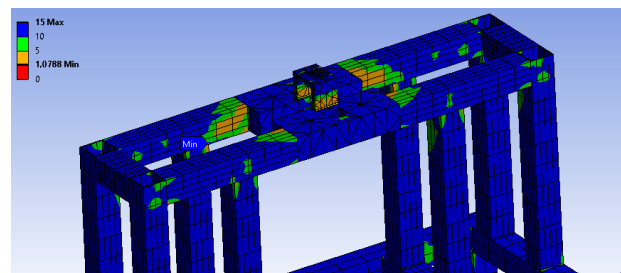


Figura 10. Factor de seguridad de la estructura [21]

Para el volante de inercia en la Figura 11[21], se determina el esfuerzo presente en la lámina rolada, en el momento en el que la llanta hace contacto con la superficie del volante ejerciendo la carga máxima. Y se establece que el esfuerzo máximo presente es de 13,385 MPa [14].

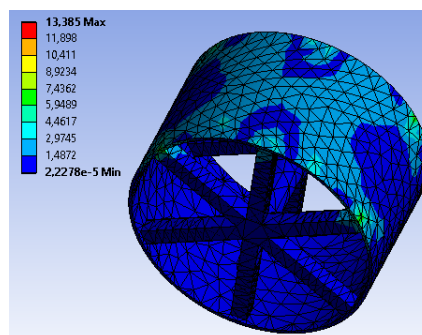
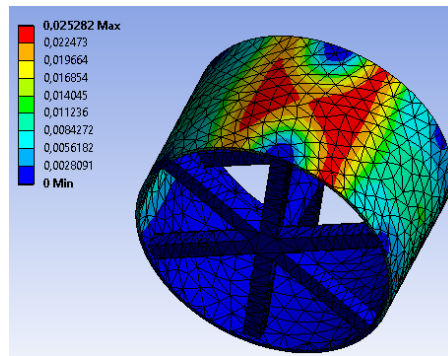


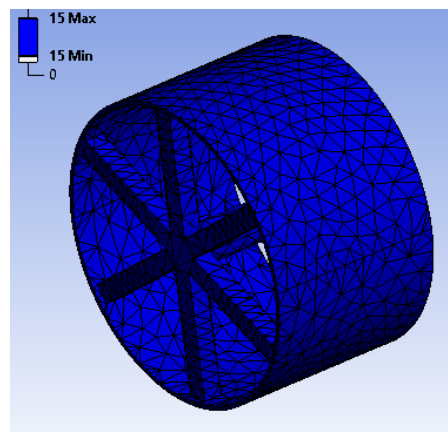
Figura 11. Esfuerzos de tensión en el volante [21]

Se establece la deformación en el material de la superficie del volante en la Figura 12 [21], que se presenta durante la prueba debido al contacto de la llanta y la presión que ejerce el actuador sobre está, representando el peso de la aeronave, la deformación máxima es de 0,0255 mm [14].



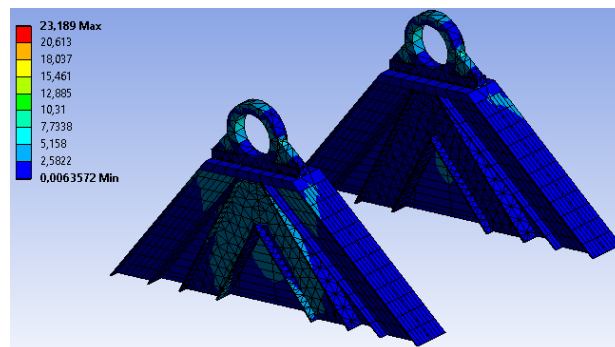
**Figura 12.** Deformación de lámina del volante [21]

El análisis del factor de seguridad del volante en la Figura 13 [21], respecto a una carga perpendicular en la superficie, establece la integridad del volante durante la prueba y se determinó que el factor de seguridad es mínimo es de 15 [14].



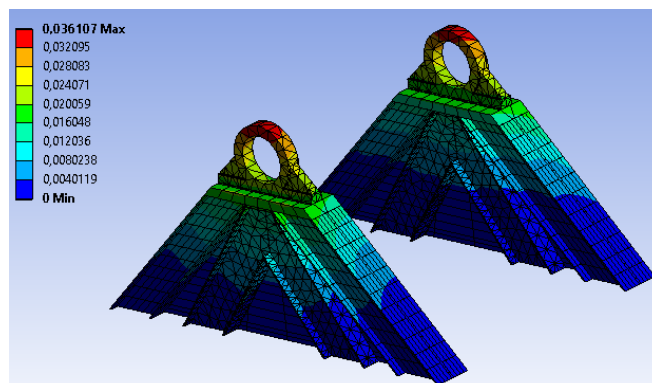
**Figura 13.** Factor de seguridad del volante [21]

Para el soporte del volante se analizó los esfuerzos presentes debido a la carga durante la prueba y al peso del volante en la Figura 14 [21]. Donde se determinó esfuerzos máximos cercanos a 23,189 MPa en los rodamientos [14].



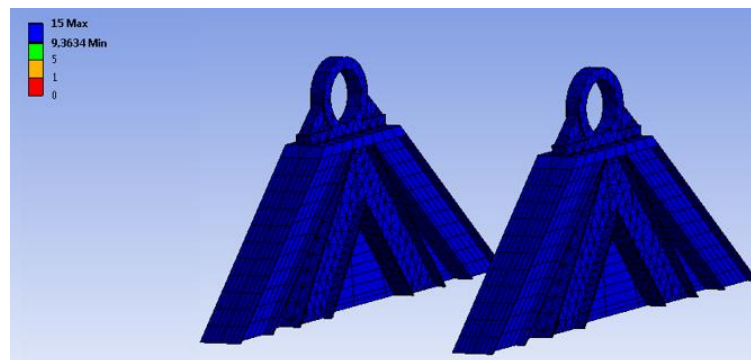
**Figura 14.** Esfuerzos de tensión del soporte del volante [21]

Junto al esfuerzo se establece la deformación de los soportes del volante en la Figura 15 [21], de modo que se determine la zona que soportara compresión. El punto de deformación máxima se presenta en la sección de los rodamientos con un valor de 0,036107 mm [14].



**Figura 15.** Deformación de soporte del volante [21]

El factor de seguridad del soporte del volante se determina en la Figura 16 [21], debido a que se analiza el comportamiento del mismo durante la operación del banco y demostrar que no pone en riesgo la prueba ni la integridad de los operadores, el factor de seguridad mínimo es de 9,363 [14].



**Figura 16.** Factor de seguridad del volante [21]

#### 4.6 Especificaciones ergonómicas y demarcación

Se debe determinar la postura y el límite de carga máximo que puede llegar a levantar o desplazar un operador del banco de pruebas, este análisis que se realizó en el inciso 3.7 se hizo mediante el método de Niosh. El estudio se realiza evaluando los aspectos biomecánicos, que consideran valores límite como que la fuerza ejercida por compresión en las vértebras no debe ser mayor a 3,4 kN. Otro aspecto es el fisiológico que determina los levantamientos repetitivos, que no deben generar en el operador un gasto energético mayor a 9,5 kcal/ min [15].

La demarcación y clasificación mediante colores, permite al personal conocer el tipo de operación del componente del banco de pruebas. De modo que se logre evitar riesgos en la salud durante la manipulación de los componentes. Se debe establecer un área de trabajo que debe ir demarcada por una línea gruesa de color amarillo alrededor del banco, evitando que personal ajeno a la prueba ponga en riesgo su integridad durante las pruebas. En la siguiente Tabla 8 se especifica lo requerido por el ministerio de trabajo para la demarcación [16].

**Tabla 8.** Demarcación del área de operación del banco de pruebas [16].

Área de seguridad de operación	En metros
Ancho de línea de demarcación	0,05
Ancho de pasillo, para tránsito de personas	1,20
Distancia de línea demarcación al banco	0,80
Distancia entre pared y el banco	0,50

### 5. CONCLUSIONES

En cuanto a los requerimientos de la normatividad FAR 23 establecidos en la matriz de requisitos de certificación y los ítems de la matriz de decisión se logra determinar las diferentes propuestas de configuración del banco de pruebas. Así mismo se realiza un estudio de ponderación para determinar la configuración más apropiada para cumplir con las pruebas a realizar para la certificación del producto aeronáutico [21].

A partir de la propuesta de configuración del banco seleccionada de la matriz de decisión, se realizan modificaciones a la estructura de modo que se satisfagan los requerimientos del cliente. Es necesario realizar un análisis estructural posterior a las modificaciones para determinar si la nueva configuración afecta estructuralmente la integridad del banco en caso de ser así, se deben realizar las modificaciones pertinentes y complementar con refuerzos estructurales que eviten poner en riesgo la operación [21].

El análisis estructural especificado en el proyecto se realizó únicamente para la configuración estructural seleccionada donde los componentes estructurales son de sección transversal cuadrada y de material ASTM A500. La selección de estos comentes se realizó debido a que se pueden adquirir en la industria colombiana. Si se desea modificar el material o el tipo de sección transversal, es necesario realizar nuevamente un estudio estructural y los cálculos respectivos [21].

Se determina las dimensiones y especificaciones de las uniones soldadas del banco de pruebas, donde se establece las condiciones mínimas para evitar fallas en la integridad estructural, respectivamente en la unión de las vigas. De modo que se recomienda usar un electrodo con propiedades similares al electrodo E7024 y que genere un espesor de cordón de soldadura mayor al establecido en el desarrollo experimental [21].

Existe la posibilidad de emplear otras marcas y configuraciones de componentes hidráulicos para el funcionamiento del banco, pero siempre es necesario que los elementos a emplear cubran los requerimientos establecidos para la operación de los sistemas de aproximación y carga. Además, los componentes no deben exceder sus condiciones máximas de operación de modo que no se ponga en riesgo la seguridad del operador y de la prueba. Es necesario simular en el software FluidSim-H la operación del sistema hidráulico antes de iniciar con el proceso de construcción e implementación [21].

El dimensionamiento del volante es el ideal para cumplir los requisitos de la normatividad. En caso de probar aeronaves que requieren una energía cinética menor solo se debe reducir las revoluciones del motor de la rueda de fricción para hacer girar el volante a menores revoluciones y la carga ejercida por el actuador que sujeta la llanta debe ser similar al peso máximo de despegue de la aeronave a probar [21].

Se establece que, para la selección de los rodamientos del eje del volante de inercia, estos deben ser elegidos por catálogo y cumplir con las especificaciones antes vistas. De modo que se requiere un mínimo de 2 rodamientos de configuración cilíndrica y cónica; con sus respectivas chumaceras a cada extremo del eje del volante para la operación del banco [21].

Por otra parte, se determina que la aeronave más grande y pesada a probar en el banco es el CASA 212 de la FAC, se establece que el volante debe generar alrededor de 445 rpm. Con base en esta prueba se establece que no es necesario que el volante alcance las revoluciones máximas de operación y por lo tanto no se requiere emplear un motor eléctrico de tan altas prestaciones para la rueda de fricción. Se recomienda el uso de un motor de 2500 rpm con 2HP que es mucho más viable encontrar en el mercado y cumple con los objetivos de la prueba [21].

El modelamiento CAD es el proceso que se usó para representar el diseño del banco de pruebas con base a las dimensiones, cálculos y análisis estructural de los componentes a emplear. Es decir, el diseño final es la integración de los diferentes sistemas para la operación del banco y respectivamente la ejecución de pruebas; en caso de modificación de un elemento o una sección del banco de pruebas, se puede alterar su definición de diseño y se recomienda revisar cada sistema que integra el banco y como la respectiva alteración afecta la operación [21].

El proceso de simulación por elementos finitos mediante la herramienta ANSYS permite observar el comportamiento de los componentes del banco y determinar si es necesario realizar modificaciones al diseño. Se recomienda mejorar el mallado de cada componente según su forma mediante herramientas de malla del software, además de cada resultado se requiere realizar un proceso de convergencia que permita reducir aún más el porcentaje de error de la simulación con la condición de operación real [21].

Se establece respecto al análisis por elementos finitos, que la estructura del banco soporta la carga de prueba máxima que hace referencia al peso máximo de la aeronave CASA 212. Es decir, la estructura no se deforma ni sufre daños para su carga máxima de operación establecida por la normatividad FAR 23. Se determina que la configuración del volante de inercia soporta la carga máxima de operación antes mencionada y no sufre flexión la lámina durante la prueba. El soporte del volante también soporta el peso del mismo y la carga de la prueba con un factor de seguridad alto evitando daños a la estructura y no pone en riesgo la seguridad operacional. Respecto a lo anterior se recomienda seguir el diseño descrito en el documento para la fabricación del banco de pruebas [21].

La operación y manipulación del banco de pruebas debe cumplir con todas las disposiciones ergonómicas para evitar daños en la salud del personal. El peso recomendado a cargar por el operador es de 11,5 kg. La llanta de una aeronave pesa un aproximado de 10 kg lo que indica que se puede realizar la operación. El operador no debe exceder la capacidad de carga establecida y de esta forma evitar que ponga en riesgo su integridad física [21].

El operador debe cumplir con todos los métodos de prevención durante la prueba y seguir el código de colores que exige el ministerio de trabajo, junto con las respectivas normas de seguridad que evitan poner en riesgo la integridad física del personal y en caso de que se presente un incidente en la operación del banco de pruebas, este no se convierta en un accidente poniendo en riesgo la vida de la persona. De modo que se requiere seguir los procedimientos de seguridad antes de operar el banco de pruebas [21].

## REFERENCIAS

- [1] Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic, and Commuter Category Airplanes– Part 23 (2012). Federal Aviation Administration (FAA).
- [2] Technical Standard Order (TSO-C26) (2016). Aircraft Wheels, Brakes and Wheel/Brake Assemblies for Parts 23, 27 and 29 Aircraft. Federal Aviation Administration (FAA).
- [3] Technical Standard Order (TSO-C135) (2002). Transport Airplane Wheels and Wheel and Brake Assemblies. Federal Aviation Administration (FAA).
- [4] Advisory Circular (AC 25.735-1) (2002). Brakes and Braking Systems Certification Tests and Analysis. Federal Aviation Administration (FAA).
- [5] Aerospace Standard (AS 5714) (2017). Minimum Performance Standard for Parts 23, 27, and 29 Aircraft Wheels, Brakes, and Wheel and Brake Assemblies. Society of Automotive Engineers.
- [6] Richard, B & Keith, N. (2008). Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. McGraw Hill.
- [7] Potter, M. (2002). Mecánica de Fluidos. Thomson Learning.
- [8] Cilindro Hidraulicos (2018). Especificaciones Cilindros Hidraulicos RCH-123 y RC-55. Enerpac Power Solutions, Global Force.
- [9] Oberg, E. & Horton H. (1984). Manual Universal de la Tecnica Mecanica. Editorial Labor.
- [10] Perfiles Estructurales (2018). Perfil Estructural de Acero ASTM A500. Consorcio metalúrgico nacional LTDA, Colmena.
- [11] Láminas de Acero (2018). Aceros Aleados. Especificaciones del Acero SAE 4340. Industria Aceros Bravo.
- [12] Mott, R. (2006). Diseño de Elementos de Maquinas. Pearson Educación.
- [13] American Welding Society (1991). Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. The American Welding Society Inc.
- [14] ANSYS (Version 18.0) “Software” (2018). Engineering Simulation and 3D Design Software, Ansys workbench – Static Structural. ANSYS inc.
- [15] Antonio, J. & Diego, M. (2015). Evaluación ergonómica del levantamiento de carga mediante la ecuación de Niosh. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia.
- [16] Garcia, A. (2015). Plan de Emergencia, señalizacion y Demarcacion de areas de trabajo. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- [17] Centrales Hidraulicas (2018). Unidades Hidráulicas Modelo UG-H. Manejo de las tecnologías hidráulicas productos PRAYCO, Distritec S.A.
- [18] FluidSim-H (Version 4.2) “Software”. (2018). Fluid Power Training Hydraulic. FESTO.
- [19] Wingquist, S. (2017). SKF Group | Bearings, Lubrication, Mechatronics & More. NUP 240 ECM and 32040-X. SKF Colombia S.A.
- [20] CATIA (Version 6) “Software”. (2018). Computer-Aided Three Dimensional Interactive Application. Dassault Systèmes SE.
- [21] Merchan, F., Torres, A. & Rodriguez, E. (2018). Diseño Preliminar De Un Banco De Pruebas De Rodaje Y Sistemas De Frenos De Aeronaves Categoria FAR 23. Universidad de San Buenaventura.

# Análisis estructural del ala de una aeronave categoría normal sometida a sus cargas críticas de diseño según normativa FAR 23

Iván J. Sánchez S.<sup>1</sup>

Fabio A. Merchán R.<sup>2</sup>

Carlos A. Hernández R.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Universidad de San Buenaventura

Bogotá – Colombia

<sup>3</sup> Fuerza Aérea Colombiana

Madrid – Colombia

El presente documento describe los diferentes métodos de análisis utilizados para comprobar la resistencia estructural del ala de una aeronave Piper PA-23 Aztec, esto con el fin de desarrollar e integrar diferentes metodologías que permitan validar y predecir el comportamiento estructural de una aeronave. El primero de estos análisis consiste en la aplicación del método de los elementos finitos, mientras que el segundo consiste en un análisis matemático con las ecuaciones diferenciales estándar derivadas del modelo de viga de Bernoulli-Euler y, por último, la realización de un ensayo en tierra en el cual se apliquen las cargas críticas de diseño, es decir, carga límite y carga última. Lo planteado anteriormente tiene el propósito de obtener y comparar el valor del desplazamiento máximo en la punta del ala, para de esta forma establecer el nivel de precisión de dichos métodos. Todo esto se hace en el marco del proyecto conjunto entre la Fuerza Aérea Colombiana y la Universidad de San Buenaventura que tiene como objetivo la puesta a punto en el centro de ensayos estructurales de la Fuerza Aérea Colombiana, además de generar el conocimiento necesario para analizar y demostrar la resistencia estructural de una aeronave, lo que es necesario en un proceso de certificación de un producto aeronáutico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la Fuerza Aérea Colombiana cuenta con un centro de ensayos estructurales para aeronaves categoría normal en las instalaciones del Comando Aéreo de Mantenimiento (CAMAN). Este banco de ensayos requería ser puesto a punto, y es por esta razón, se desarrolló una prueba estructural a la aeronave Piper PA-23 Aztec, propiedad de la Fuerza Aérea Colombiana. El desarrollo de esta prueba estructural y de la adecuación del banco de ensayos fue una tarea conjunta entre la Sección de Certificación Aeronáutica de la Defensa (SECAD) y la Universidad de San Buenaventura-Bogotá.

Dentro del marco del desarrollo de esta prueba estructural, el grupo de ingeniería planteó el uso de un software que utilizara el método de los elementos finitos, así como la implementación de un análisis numérico con las ecuaciones diferenciales estándar como herramientas para predecir el comportamiento estructural del ala de la aeronave bajo las cargas que se le aplicaran durante la prueba, además de determinar los puntos y áreas críticas de la estructura del ala donde se encuentren los mayores valores de deformación, esfuerzo y desplazamiento.

Una vez realizados los análisis teóricos y computacionales, se procedió a realizar el ensayo estático en las alas de la aeronave, dicho ensayo consistió en la aplicación de las cargas críticas de diseño de manera distribuida con el fin de replicar de manera precisa la forma en la que se distribuyen las cargas aerodinámicas. Durante el ensayo fueron censados algunos datos, como el desplazamiento y deformación unitaria en puntos específicos del ala. A partir de la información obtenida por los sensores durante el ensayo, se realizó una comparación con los datos teóricos obtenidos previamente para establecer el error entre los diferentes métodos.

## 2. MÉTODO

Para realizar el análisis estructural del ala de la aeronave Piper PA-23 Aztec, en primera instancia se plantean dos métodos, el primero es un análisis matemático en el cual se hace la simplificación del ala como si fuese una viga en cantiléver para poder desarrollar el análisis según el modelo de viga de Bernoulli-Euler. El segundo método es un análisis mediante el método de los elementos finitos realizado en el software Ansys, de la estructura del ala. En la Figura 7 se describe la metodología desarrollada durante el proyecto.

### 2.1 Modelo de Bernoulli-Euler

1. *Distribución de sustentación.* Las cargas que deben soportar las alas de una aeronave son causadas principalmente por las fuerzas de sustentación y arrastre, además, estas deben soportar el peso de los motores, el combustible, los elementos estructurales, etc. [1]. Para determinar la distribución de sustentación a lo largo de la envergadura en aeronaves que no posean ángulo de flechamiento ni de torsión y cuyas alas tengan una forma trapezoidal, existe un método semi-empírico desarrollado por Shrenk en 1940, el cual asume que la distribución de sustentación tiene

---

<sup>1</sup> [ijsanchez@academia.usbbog.edu.co](mailto:ijsanchez@academia.usbbog.edu.co)

<sup>2</sup> [fmerchan@usbbog.edu.co](mailto:fmerchan@usbbog.edu.co)

<sup>3</sup> [carlos.hernandezr@fac.mil.co](mailto:carlos.hernandezr@fac.mil.co)



una forma tal que puede ser igual al promedio entre la variación de la cuerda en un ala trapezoidal y en un ala elíptica. El método de Shrenk es sugerido por la Advisory Circular AC 23-19 A del 30 de abril del 2007 como una metodología válida para determinar la distribución de sustentación en el ala de aeronaves FAR 23, esta metodología tiene las características que se muestra en la Tabla 1.

FASE INICIAL	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
LEVANTAMIENTO DIMENSIONAL DEL ALA	
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DEL ALA	
IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL	
MÉTODO MATEMÁTICO	MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS
CÁLCULO DISTRIBUCIÓN DE SUSTENTACIÓN	LEVANTAMIENTO CAD
CÁLCULO CARGA CORTANTE	ENMALLADO
CÁLCULO MOMENTO FLECTOR	APLICACIÓN DE CARGAS
OBTENCIÓN DE DEFLEXIÓN	OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE DEFLEXIÓN
COMPARACIÓN DE RESULTADOS	

Figura 7. Procedimiento para el desarrollo de los análisis

Tabla 1. Características método de Shrenk [2]

Método	Aproximación	Limitaciones	Comentarios
Shrenk's NACA TM-948	Solución aproximada. Basada en lifting line theory	Alas convencionales sin flechamiento con relaciones de aspecto mayores a 5	No es completamente exacto debido a algunas Suposiciones iniciales. Fácil de aplicar

A continuación, según las ecuaciones uno, dos y tres, se muestra la variación de la sustentación para un ala de forma trapezoidal, un ala de forma elíptica y el promedio entre ambas respectivamente (ecuaciones (1-3)).

$$\text{Distribución de lift taperada} = L^T(y) = \frac{2W*n}{b(1+\lambda)} * \left[ 1 - \frac{2y}{b}(1-\lambda) \right] \quad (1)$$

$$\text{Distribución de lift eliptica} = L^E(y) = \frac{4W*n}{\pi b} * \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{b}\right)^2} \quad (2)$$

$$\text{Metodo de Shrenk} = L^{Shrenk} = \frac{1}{2} \left[ \frac{2W*n}{b} \left( \frac{1}{1+\lambda} \left( 1 - \frac{2y}{b}(1-\lambda) \right) + \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{b}\right)^2} \right) \right] \quad (3)$$

Donde:

- $W$  = Peso maximo de despegue
- $n$  = factor de carga
- $b$  = Envergadura
- $\lambda$  = Relación de taperado

Es razonable considerar que el peso de una sección de la envergadura podrá ser escalado de igual forma que la longitud de la cuerda a lo largo de la envergadura, por lo tanto, el peso distribuido decrecerá en proporción a la cuerda local desde la raíz a la punta.

2. *Carga cortante, momento flector y deflexión en el ala causada por la sustentación.* Las ecuaciones para calcular el momento flector, la carga cortante y la deflexión de un ala pueden ser encontradas en varios libros de ingeniería para el caso de un ala rectangular, donde está puede ser asumida como una viga en cantiléver con una carga distribuida uniforme de forma rectangular, pero cuando el ala es taperada, como en el caso de la aeronave de estudio, el modelo cambia, ya que no solo la sustentación varía proporcionalmente a la cuerda, sino que al cambiar la cuerda y el espesor del ala a lo largo de la envergadura el momento de inercia de área también cambia, es decir que ya no es constante a lo largo de la envergadura. [3]

El cálculo exacto de la deflexión del ala involucra la integración de una serie de ecuaciones según el modelo de viga de Bernoulli-Euler. El momento de inercia de área es una propiedad que es de fundamental importancia determinar cuándo se pretende hacer un análisis de deflexión o desplazamiento vertical. En la raíz del ala se presentan las mayores magnitudes del momento flector y de sustentación, mientras que el ángulo de deflexión y el desplazamiento son máximos en la punta del ala de la aeronave. Las ecuaciones diferenciales estándar derivadas del modelo de vigas de Bernoulli-Euler, teniendo en cuenta que el eje Y está a lo largo de la envergadura, relaciona las cargas y deflexiones en el ala según las ecuaciones (4-7).

$$dS = q dy \quad (4)$$

$$dM = S dy \quad (5)$$

$$d\theta = \frac{M}{EI} dy \quad (6)$$

$$dw = \theta dy \quad (7)$$

Para poder realizar la integración de estas ecuaciones, se hace necesario imponer algunas condiciones de frontera, las cuales, para un ala en cantiléver como la de la aeronave Piper son:

Para  $y = b/2$ :

$$\begin{aligned} S &= 0 \\ M &= 0 \end{aligned}$$

Para  $y = 0$ :

$$\begin{aligned} \theta &= 0 \\ w &= 0 \end{aligned}$$

Las ecuaciones mostradas anteriormente pueden ser numéricamente integradas para cualquier carga de sustentación no uniforme, de la misma manera que para cualquier distribución del producto entre el módulo de elasticidad y el momento de inercia. Todas las variables pueden ser definidas para un número de ubicaciones discretas a lo largo de la envergadura. Por lo tanto, las ecuaciones diferenciales pueden ser aproximadas mediante el uso de diferencias finita, para ello se puede aproximar a la integración mediante el uso de la regla del trapecio. [4]. La ecuación 8 describe el momento cortante para un diferencial de área, mientras que las ecuaciones (9-11) describen el momento flector, el ángulo y distancia de desplazamiento respectivamente.

$$S_{i+1} - S_i = \frac{q_{i+1} + q_i}{2} * (y_{i+1} - y_i) \quad (9)$$

$$M_{i+1} - M_i = \frac{S_{i+1} + S_i}{2} * (y_{i+1} - y_i) \quad (10)$$

$$\theta_{i+1} - \theta_i = \frac{1}{2} * \left( \frac{M_{i+1}}{EI_{i+1}} + \frac{M_i}{EI_i} \right) * (y_{i+1} - y_i) \quad (11)$$

$$w_{i+1} - w_i = \frac{\theta_{i+1} + \theta_i}{2} * (y_{i+1} - y_i) \quad (12)$$

Para este problema estáticamente determinado, la sumatoria de cada ecuación empieza en donde se conocen las condiciones de frontera. Para el caso del momento flector y la carga cortante se conocen las condiciones iniciales en la punta del ala, mientras que en el caso de la deflexión y el ángulo de deflexión las condiciones iniciales son conocidas en la raíz del ala.

- **Momento de inercia de área.** El cálculo de la deflexión vertical de un ala bajo el efecto de las cargas aplicadas sobre esta requiere conocer la distribución del momento de inercia de área (o también conocido como segundo momento de área) a lo largo de la envergadura. El momento de inercia de área puede ser definido como la resistencia de un miembro estructural a la flexión, y es función de la geometría del elemento, en este caso, esta geometría es la forma del perfil de la viga principal del ala, ya que este es el miembro estructural que debe soportar la mayor parte de las cargas aplicadas sobre el ala. Ya que la viga principal de la aeronave puede ser simplificada como una viga en forma de I, la obtención del momento de inercia de área puede hacerse dividiendo el área en tres rectángulos diferentes, el alma, el patín superior y el patín inferior, según se muestra en la Figura 8 y determinar de forma individual el momento de inercia de los tres elementos de la viga y sumarlos para obtener el momento de inercia de área total. El momento de inercia de área se encuentra mediante las ecuaciones (12) y (13).

$$I = \frac{BH^3}{12} \quad (12)$$

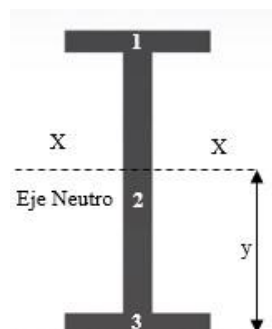
$$I_{TOTAL} = \sum (\bar{I}_i + A_i * d_i^2) \quad (13)$$

Donde:

A: Área del elemento individual

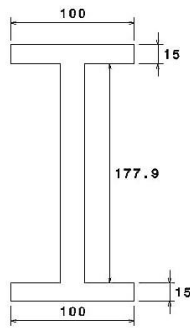
d: Distancia vertical del centroide del segmento al eje neutro.

B: Base del rectángulo



**Figura 8.** División de la viga para obtener el momento de área de inercia

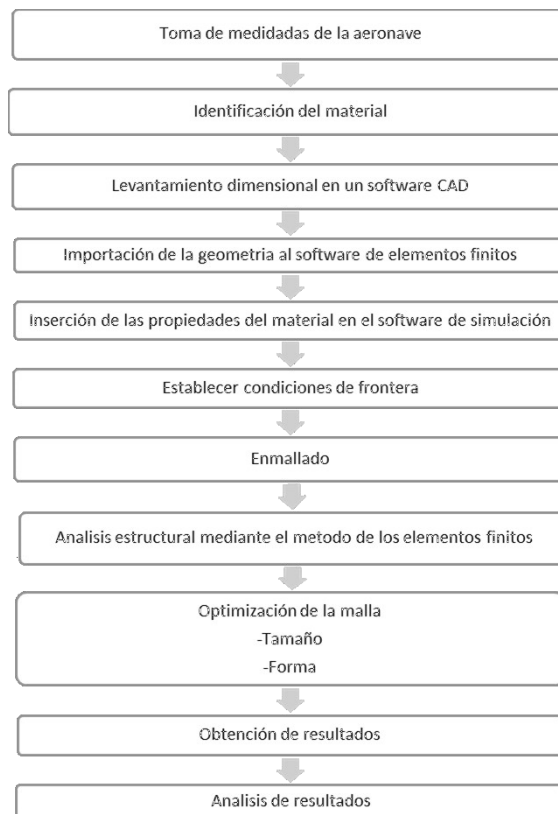
El eje neutro fue tomado en el centro debido a que la viga es simétrica tanto en la parte inferior como en la parte superior de esta línea [4]. Las medidas de la sección transversal se muestran en la Figura 9.



**Figura 9.** Dimensiones de la sección transversal de la viga

## 2.2 Preprocesamiento método de elementos finitos

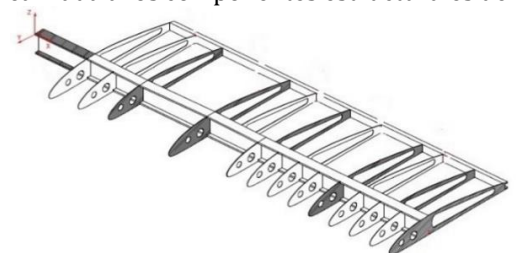
En esta sección se describe el proceso para llevar a cabo la simulación del comportamiento de la estructura del ala bajo las cargas determinadas anteriormente. Para ello se hizo uso del módulo estructural del software ANSYS®, teniendo especial atención en lo que sucede en la viga principal, ya que este es el componente estructural más importante en el ala. Los análisis fueron llevados a cabo en una licencia completa propiedad de la fuerza aérea colombiana, en los computadores ubicados en el comando general de la fuerza aérea en Bogotá. La metodología implementada en el desarrollo de la simulación con el método de los elementos finitos es la que se describe en la Figura 10.



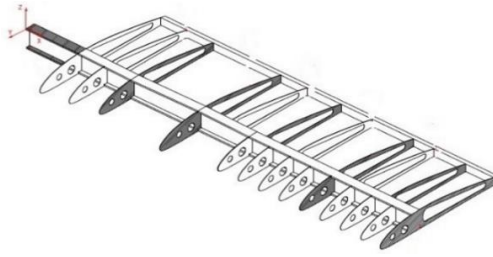
**Figura 10.** Metodología de desarrollo de la simulación

## 2.3 Geometría

La geometría del ala de la aeronave Piper PA-23, fue modelada en el software de diseño asistido CATIA, a partir de las dimensiones obtenidas mediante la medición por comparación directa realizada a los componentes estructurales del



ala, según se muestra en la Figura 11.



**Figura 11.** Diagrama simplificado de la estructura del ala

## 2.4 Materiales del ala

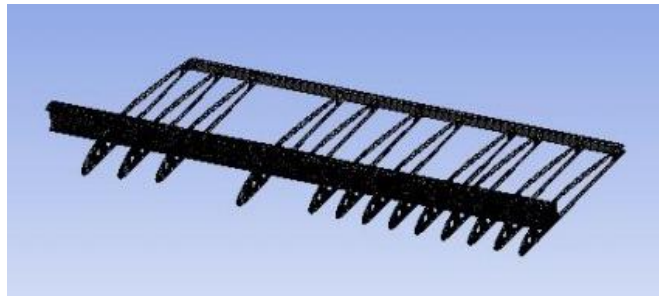
Una vez hecho el levantamiento dimensional de la estructura del ala, se hizo necesario conocer los materiales de los que se componen las partes de esta, y ya que no había ninguna fuente de información disponible que permitiera saber con exactitud cuáles eran dichos materiales, fue entonces necesario hacer una caracterización de la viga principal, ya que este es el principal elemento estructural del ala. Las características del material de la viga se especifican en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características del material de la viga principal ([www.asm.matweb.com](http://www.asm.matweb.com))

Material	Al 2024 T4
Densidad	2785 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	73100 MPa
Relación de Poisson	0,33
Módulo de rigidez	27481 MPa
Esfuerzo de fluencia	324 MPa

## 2.5 Proceso de Enmallado

El proceso de enmallado es una parte fundamental para poder obtener unos resultados acertados. Para este caso en específico, que consiste en el análisis estructural del ala de una aeronave bajo sus cargas críticas de diseño (Figura 6 y Tablas 3 y 4).



**Figura 12.** Enmallado de la geometría

**Tabla 3.** Características de la malla

Características de la malla	
Nodos	294669
Elementos	122141

**Tabla 4.** Calidad de la malla

Calidad Ortogonal	
Mínima	0,369
Máxima	0,999
Promedio	0,893
Desviación estándar	0,119

## 2.6 Cargas aplicadas

Ya que se requiere estudiar el comportamiento estructural del ala de la aeronave bajo las cargas críticas de diseño, es necesario aplicar estas cargas sobre la geometría que representa la estructura del ala en el software de elementos finitos como una carga distribuida. Ya que el software solo permite la aplicación de una presión que pueda ser variable en función de una distancia, es necesario que las fuerzas sean transformadas en presiones, para ello las fuerzas se pueden dividir entre el área de la cara superior de la viga principal, según la ecuación (14).

$$P = \frac{F}{A} \quad (14)$$

Donde el área de la cara superior de la viga principal es 0,4930 m<sup>2</sup>. Para aplicar la presión variable a lo largo de la envergadura, al momento de ingresar las cargas en el software se debió definir que el tipo de carga iba a ser una presión, posteriormente definir que esta iba a ser normal a la cara superior de la viga principal. Al ingresar la magnitud

se debió definir que esta iba a ser tabulada y que la variable independiente iba a ser la distancia en el eje Y. La magnitud de las presiones ingresadas en el software son las que se muestran en la Tabla 5.

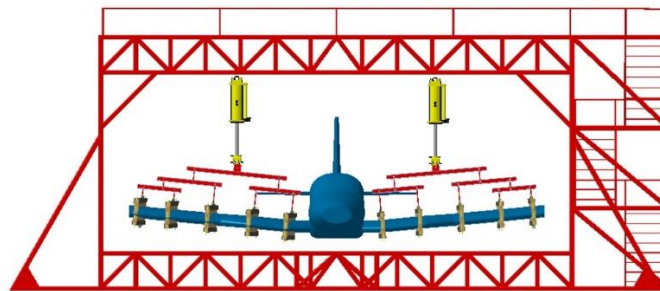
**Tabla 5.** Presiones ingresadas a lo largo de la viga principal

Y (m)	Presión (PA)		
	N=1	N=3,8	N=5,7
1,332	-6793	-25819	-38728
2,194	-4835	-18997	-27569
3,36	-4588	-18474	-26168
3,882	-4231	-16395	-24137
4,563	-1866	-7681	-10663
4,924	0	0	0

## 2.7 Montaje del Ensayo Estático

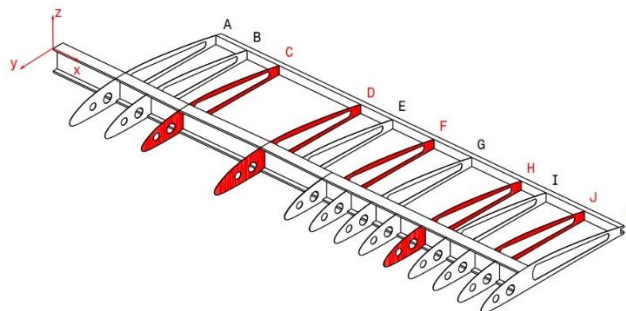
Para el desarrollo del ensayo estático mediante el cual se pudieran aplicar las cargas de diseño en la aeronave, fue necesario realizar un largo proceso de adecuación del banco de ensayos, además del diseño y fabricación de un mecanismo que permitiera distribuir las cargas a lo largo de la envergadura de la aeronave según ocurre en condiciones reales. Este tipo de ensayos estáticos tienen como fin demostrar el cumplimiento con los requisitos de certificación que exigen que la estructura de una aeronave pueda soportar una cantidad específica de gravedades sin sufrir ningún tipo de deformación y/o falla estructural.

El mecanismo de aplicación de cargas consiste en un conjunto de vigas de diferentes longitudes dispuestas de manera horizontal y unidas unas a otras mediante barras verticales, esto permite que puedan ser aplicadas cargas específicas en puntos determinados a lo largo de la envergadura. En la Figura 13 se muestra de manera general el montaje del distribuidor de cargas sobre la aeronave, en esta imagen se observa que para transmitir las fuerzas directamente sobre el ala se hizo uso de lo que se conoce como “cunas”, las cuales son unas láminas de madera con un corte interno con la misma forma del perfil aerodinámico del ala.



**Figura 13.** Esquema del Montaje general del ensayo

Una vez obtenida la distribución de sustentación a lo largo de la envergadura, la cual se presenta en este documento en la sección Distribución de sustentación, se hizo necesario transformar esa carga distribuida en un número finito de cargas puntuales que pudieran ser aplicadas y que, a su vez, fuesen completamente representativas. Para esto, se dividió el área bajo la curva de sustentación en cinco secciones, para las cuales se debía determinar el área de cada una de las secciones, ya que esto representa la magnitud de la carga puntual que debía ser aplicada. Para esto se utilizó el método de Simpson. Para aplicar las cargas sobre el ala, se definieron unos puntos específicos a lo largo de la envergadura sobre los cuales aplicar las cargas. Dichos puntos se ilustran en la Figura 14. La posición con respecto al eje de simetría de la aeronave de las cargas son las que se muestra en la Tabla 6.



**Figura 14.** Puntos de aplicación de carga

**Tabla 6.** Ubicación de las cunas

Ubicación de las cargas	
1	0,669 m
2	1,532 m
3	2,313 m
4	3,229 m
5	4,103 m

## 2.8 Diseño de las cunas

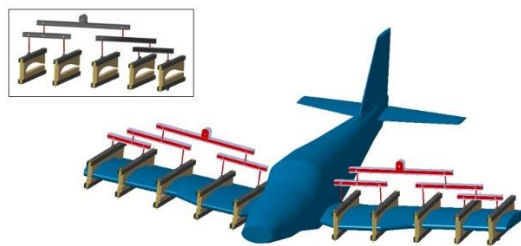
El diseño de la cuna fue escogido según diseños parecidos, este consiste en un cuerpo de madera MDF, dos vigas en C de acero estructural A-36 y dos varillas roscadas, una en cada extremo de la cuna que permiten unir ambas vigas. Los materiales escogidos para la construcción fueron seleccionados por su relativo bajo costo y por ser fáciles de adquirir, además porque esta configuración permite soportar cargas a tensión de gran magnitud, sin embargo, para determinar la resistencia estructural de la cuna, se realizó una prueba de tensión en la máquina universal de ensayos de la Universidad de San Buenaventura Sede Bogotá, además de una simulación mediante el método de los elementos finitos para determinar los esfuerzos máximos que se producían en la cuna bajo la aplicación de las cargas (Figura 9). Los materiales y las características de los elementos que hacen parte de la cuna son los que se muestran en Tabla 7 y en la Tabla 8.

**Tabla 7.** Generalidades de la madera MDF

Cuerpo de la Cuna	
Material	MDF
Densidad	736 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	4 GPa
Relación de Poisson	0,25
Módulo de rigidez	1,6 GPa
Esfuerzo de fluencia	7 MPa

**Tabla 8.** Generalidades del acero A-36 ([www.asm.matweb.com](http://www.asm.matweb.com))

Viga Superior e Inferior	
Material	A - 36
Densidad	7850 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	200 GPa
Relación de Poisson	0,3
Módulo de rigidez	76 GPa
Esfuerzo de fluencia	250 MPa



**Figura 15.** Ensamble del distribuidor de cargas con la aeronave

## 2.9 Sensores de medición

La instalación de sensores en algunos puntos específicos del ala se hizo con el fin de medir parámetros tales como deformaciones y desplazamientos.

**Tabla 9.** Ubicación sensores de deformación

# De Sensor	Tipo de Sensor	Ubicación		
		X	Y	Z
L4	Galga Extensométrica	3,581 m	-0,02 m	-0,192 m
L1	Captador de desplazamiento	2,46 m	-0,02 m	-0,192 m
L2	Captador de desplazamiento	4,92 m	-0,02 m	-0,192 m

- *Captadores de desplazamiento (d).* Se instalaron 2 captadores de desplazamiento en cada ala para medir las deflexiones en la estructura durante la prueba. Los sensores se ubicaron en los puntos indicados en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Captadores de desplazamiento instalados galgas Extensométricas (G)

I.D	Dirección	Modelo	Fabricante	Serie
RH 1	Z	SP 2-50	Celesco	2514
RH 2	Z	SP 2-50	Celesco	3015
LH 1	Z	SP 2-50	SP 2-50	2561

Para medir la deformación unitaria y los esfuerzos en los puntos especificados en la Tabla 3 extensómetros en el ala derecha y uno en el ala izquierda (Tabla 11).

**Tabla 11.** Galgas extensometricas instaladas

G	Dirección	Gage factor @ 24 °C	Fabricante	Serie
4	Y	2,155 ±0,25%	Micro-Meassuraments	201405US

- *Celdas de carga (c)*

**Tabla 12.** Celda de carga usada

C	Tensión/Compresión	Capacidad	Fabricante	Serie	Ubicación
1	Tensión	10 toneladas	LEXUS	J140627 208	Unión actuador-mecano

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resultados Modelo Bernoulli-Euler

Una vez conocida la forma en la que se distribuye la sustentación a lo largo de la envergadura de la aeronave, y algunas propiedades importantes, tales como el material de la estructura del ala y el momento de inercia de área (el cual está en función de la geometría de la sección transversal del ala, es decir, del perfil aerodinámico) se pueden determinar los diagramas de carga cortante, momento flector y desplazamiento vertical en el ala de la aeronave, para comparar los resultados con la simulación.

#### 3.2 Distribución de sustentación

La distribución de sustentación a lo largo de la envergadura en la aeronave Piper PA 23 Aztec para el factor de carga limite y el factor de carga último se obtuvo a partir de las ecuaciones y el método de Shrenk, el cual fue explicado antes en este documento. Esta distribución se muestra en la Figura 16 y la Tabla 13.

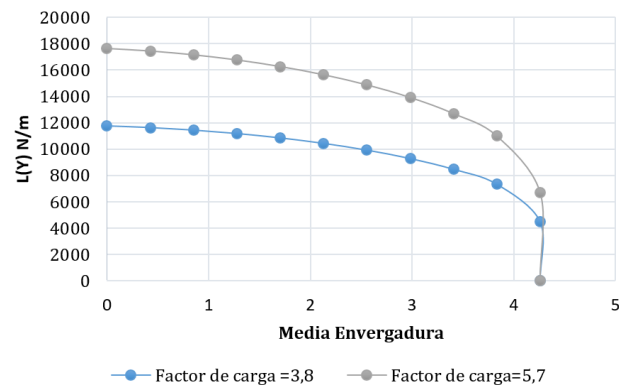


Figura 16. Distribución de sustentación

Tabla 13. Valores de sustentación a lo largo de la envergadura para diferentes factores de carga

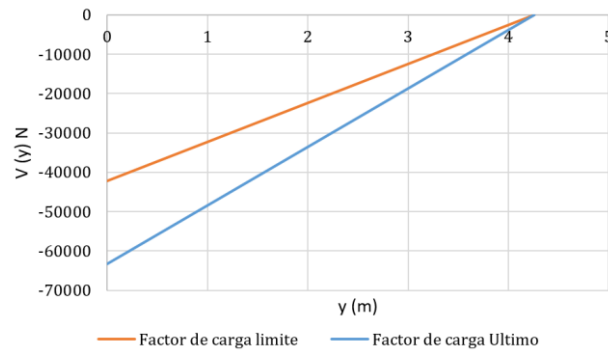
Y (m)	Factor de carga uno	Factor de carga límite	Factor de carga último
0	3092,504709	11751,5179	17627,27684
0,4259	3058,843206	11623,60418	17435,40628
0,8518	3008,27282	11431,43672	17147,15507
1,2777	2939,985931	11171,94654	16757,91981
1,7036	2852,483825	10839,43853	16259,1578
2,1295	2743,277579	10424,4548	15636,6822
2,5554	2608,264142	9911,403741	14867,10561
2,9813	2440,307041	9273,166755	13909,75013
3,4072	2225,362963	8456,379258	12684,56889
3,8331	1927,415394	7324,178499	10986,26775
4,259	1177,998811	4476,395482	6714,593223
4,259	0	0	0

#### 3.3 Carga cortante, momento flector y deflexión en el ala causada por la sustentación

La magnitud de la carga cortante y del momento flector en varias secciones a lo largo de la semi-envergadura de la aeronave, tanto para carga limite como para carga ultima, se determinó a partir del modelo de viga de Bernoulli - Euler. Es importante determinar la distribución de carga cortante y momento flector ya que esto deriva en desplazamientos a lo largo de la envergadura [5] (Figuras 11 y 12, y Tablas 14 y 15).

Tabla 14. Valores de la carga cortante y el momento flector para carga limite

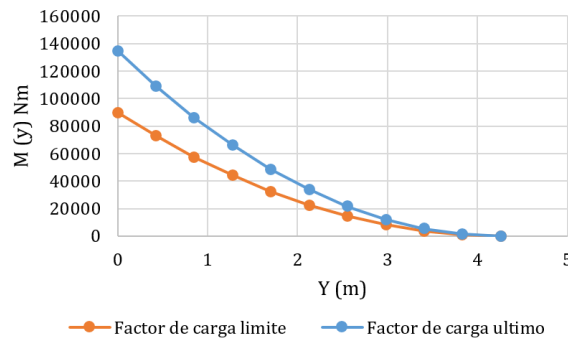
Y (m)	S (N)	M (Nm)
0	-42230,179	89929,16618
0,4259	-38007,1611	72842,62461
0,8518	-33784,1432	57554,66636
1,2777	-29561,1253	44065,29143
1,7036	-25338,1074	32374,49982
2,1295	-21115,0895	22482,29155
2,5554	-16892,0716	14388,66659
2,9813	-12669,0537	8093,624956
3,4072	-8446,0358	3597,166647
3,8331	-4223,0179	899,2916618
4,259	0	0



**Figura 17.** Diagrama de carga cortante

**Tabla 15.** Valores de la carga cortante y el momento flector para carga ultima

Y (m)	S (N)	M (Nm)
0	-63345,2685	134893,7493
0,4259	-57010,74165	109263,9369
0,8518	-50676,2148	86331,99953
1,2777	-44341,68795	66097,93714
1,7036	-38007,1611	48561,74974
2,1295	-31672,63425	33723,43732
2,5554	-25338,1074	21582,99988
2,9813	-19003,58055	12140,43743
3,4072	-12669,0537	5395,749971
3,8331	-6334,52685	1348,937493
4,259	0	0



**Figura 18.** Diagrama de momento flector

- **Momento de inercia de área.** El momento de inercia de área es una propiedad que es de fundamental importancia determinar cuándo se pretende hacer un análisis de deflexión o desplazamiento vertical. Según se explicó antes en este documento, el momento de inercia de área de la viga principal se obtiene mediante la suma de la inercia de sus elementos (Tablas 16 a 18 y Figura 13).

**Tabla 16.** Características de la sección I

Sección 1	
I	2,8125E-08
A	0,001501755
d	0,10355
I1	1,61308E-05

**Tabla 17.** Características de la sección II

Sección 2	
I	9,38375E-06
A	0,00354358
d	0
I2	9,38375E-06

**Tabla 18.** Características de la sección III

Sección 3	
I	2,81579E-08
A	0,0015
d	0,10355
I3	1,61121E-05

$$I_{TOTAL} = 4,16267 E - 05 m^4$$



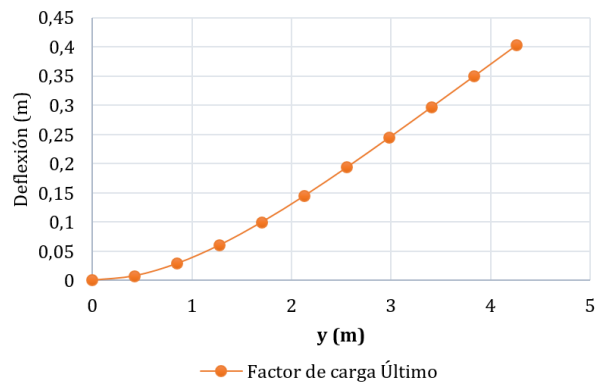


Figura 19. Desplazamiento vertical a lo largo de la envergadura

### 3.4 Resultados Método de los Elementos Finitos

Los resultados de desplazamiento, esfuerzo principal, deformación unitaria y esfuerzo normal, obtenidos mediante las simulaciones realizadas para cada uno de los casos de carga se muestran en esta sección del documento. En la **Tabla 19** se exponen los resultados de la simulación para factor de carga límite.

Tabla 19. Resultados de la simulación para carga limite

	Desplazamiento	Esfuerzo Principal Máximo	Deformación unitaria normal en el eje Y	Esfuerzo normal en el eje Y	Error Estructural
Mínimo	0 m	-1,943e+008 Pa	-8,8691e-003 m/m	-7,7093e+008 Pa	4,2915e-014 J
Máximo	0,4274 m	6,9689e+008 Pa	7,4756e-003 m/m	6,4597e+008 Pa	8,9001e-004 J

### 3.5 Resultados ensayo estático

El día 1 de diciembre del año 2017, en las instalaciones del Comando Aéreo de Mantenimiento CAMAN de la Fuerza Aérea Colombiana, se realizó el ensayo estático en la aeronave Piper PA 23, sentando así un precedente a nivel nacional, ya que esta fue la primera vez que se realiza una prueba de este tipo en una aeronave a escala real en Colombia. El ensayo se realizó en el centro de ensayos estructurales con la compañía de los señores generales del aire Brigadier General del Aire Andrés Garzón comandante de la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suarez y el Señor Brigadier General Luis Eduardo Contreras Meléndez comandante del Comando Aéreo de Mantenimiento CAMAN.

Durante el desarrollo del ensayo se aplicaron las cargas equivalentes a al factor de carga limite en cada una de las alas de la aeronave. Llegando hasta aproximadamente cuatro toneladas. El ensayo permitió poner a punto el banco de pruebas estructurales para aeronaves categoría FAR 23 de similares características geométricas a las de la aeronave Piper PA 23 generando así un precedente investigativo en el país ayudando al avance de la industria aeroespacial colombiana.

Durante el ensayo se llevó a cabo el monitoreo de la estructura de la aeronave usando los sensores instalados, lo que permitió conocer los valores de desplazamiento y deformación. Los captadores de desplazamiento instalados permitieron obtener los desplazamientos en dos puntos del ala derecha, uno en la punta y el otro en la mitad de la envergadura. Dichos resultados se muestran en la Figura 20 y en la Figura 21 en las cuales se relaciona la carga aplicada con el desplazamiento y la deformación en el ala.

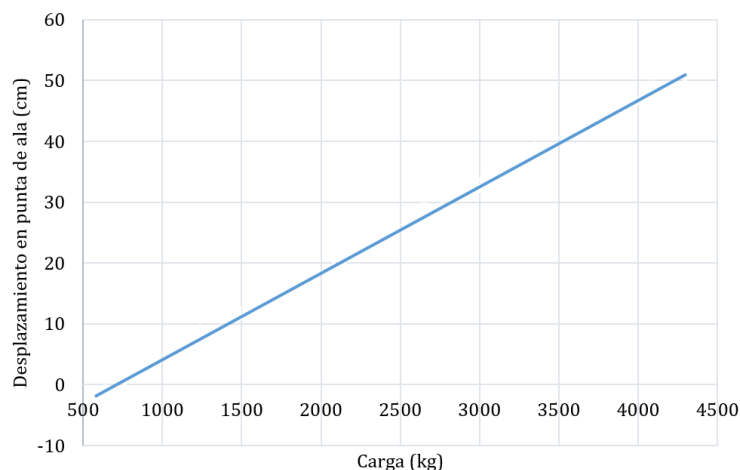
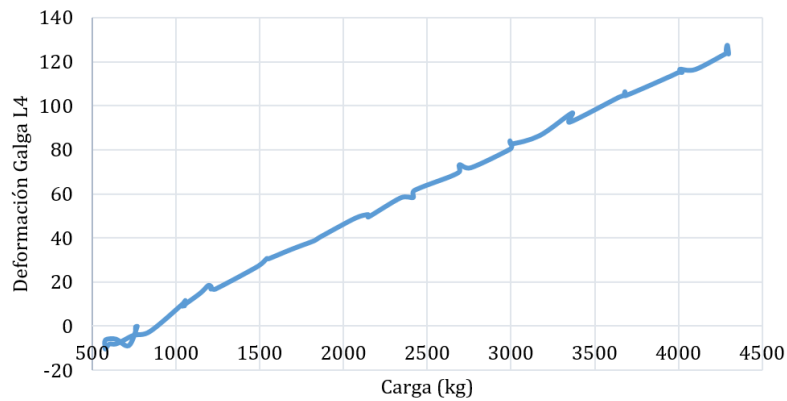


Figura 20. Desplazamiento medido durante el ensayo



**Figura 21.** Deformación medida mediante el ensayo

Para hacer una comparación entre los diferentes métodos de análisis contenidos en este documento, se presenta un cuadro comparativo que permita identificar el margen de error. Como valor de referencia se toma el desplazamiento en la punta del ala de la aeronave para hacer la comparación entre los diferentes métodos (Tabla 20).

**Tabla 20.** Comparación de los resultados mediante los diferentes métodos de análisis

Método	Valor del desplazamiento en la punta del ala
Método de análisis numérico	0,4028 m
Método de los elementos finitos	0,4274 m
Ensayo	0,5256 m
Promedio	0,45193333 m
Desviación estándar	0,0649721

Finalmente se da cierre al proyecto constatando que la estructura general del banco soporta las cargas aplicadas a la aeronave (Figura 16) y que el sistema de sensores y adquisición de datos funciona de acuerdo a los requisitos planteados para el ensayo, el banco se deja a punto para futuras pruebas en aeronaves de características similares y se constata que las modificaciones propuestas durante el desarrollo del presente proyecto sirvieron para optimizar el proceso de prueba y mejorar el módulo de adquisición de datos generando avance del sistema inicial que se tenía antes de la iniciación de este proyecto.



**Figura 22.** Montaje de la aeronave en el jig de ensayos

Se puede concluir que las diferencias entre los resultados obtenidos mediante el análisis matemático no se encuentran muy alejados de los resultados obtenidos en el ensayo y mediante el método de los elementos finitos. La diferencia entre métodos cuyos resultados están más alejados de la media, es decir el método de análisis numérico y el ensayo, es aproximadamente 23%, esto puede ser debido a que la estructura de la aeronave había perdido integridad por la falta de mantenimiento y porque ya contaba con grietas de manera anterior al ensayo.

#### 4. CONCLUSIONES

- La deflexión de un ala sometida a las cargas críticas de diseño puede ser encontrada aplicando el modelo de viga de Bernoulli – Euler, determinando el momento de inercia de área de la sección transversal del ala.
- La variación de los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos y por un análisis matemático no fue mayor al 5 por ciento, lo cual permite interpretar que ambos modelos son representativos uno de otro.
- Validar un modelo de elementos finitos puede permitir ahorrar costos, ya que para la certificación de una estructura no sería necesario llevar a cabo ensayos en tierra, sino hacer la predicción del comportamiento estructural mediante dicho modelo de elementos finitos.
- La simulación en elementos finitos arrojó valores de desplazamiento de la punta de ala de 0,4274 m, valor que fue validado con el ensayo estático realizado a la aeronave de prueba tomándolos valores entregados por los

captadores de desplazamiento que fueron de 0,5256 m, hecho que evidencio que es importante diseñar nuevos protocolos de simulación con los cuales se obtengan valores de desplazamiento cercanos a los experimentales.

- La instalación de los captadores de desplazamiento en la estructura de la aeronave requiere una previa preparación de la superficie de instalación, con esto evitar errores de lecturas durante el ensayo experimental en la aeronave. Adicional a ello es importante definir los puntos de reacción de la aeronave para evitar movimientos que invaliden la prueba de certificación, definiendo así punto de reacción en el tren delantero, en el wing box del ala y en el empenaje.

## REFERENCIAS

- [1] Corke, T. (2004). Design of aircraft. Pearson.
- [2] FAA (2007). Airframe guide for certification of part 23 Airplanes. F. A. Administration.
- [3] Lannoy, S. (2014). [Wing Bending Calculation with a Single set of Equations](#). Online [Nov 2017].
- [4] Drela. MIT Department of Aeronautics and Astronautics. [Area and bending inertia of Airfoil](#). Online [Nov 2017].
- [5] Lannoy, S. (2014). [Wing Bending Calculation with a Single set of Equations](#). Online [Oct 2017].
- [6] FAA (2016). [FAA Regulation policies](#). Online [Dec 2017].
- [7] Universidad de Salamanca (2005). [Documento de trabajo](#). Online [Jan 2018].
- [8] Megson, F. (2010). Aircraft structures. Elsevier.
- [9] [www.asm.matweb.com](http://www.asm.matweb.com)
- [10] Lannoy, S. (2013). [Method to determine correction factors for Section Modulus and Bending Inertia Equations of Wings](#). Online [Nov 2017].
- [11] Civil Air Regulations Part 3 (1949. Washington.
- [12] Merchán, A. (2017). Analisis de tolerancia al daño bajo el criterio de fractura elastico-lineal del ala de una aeronave categoria deportiva. Ciencia y poder 11(1), 46-61.
- [13] Raymer, T. (1999). Aircraft desig - A conceptual approach.
- [14] Corke, T. (2003). Design of aircraft. Pearson.
- [15] Sadraey, M. (2011). Wing design. Daniel Webster College.
- [16] Montgomery, A. (2002). Diseño Experimental. Thompson.
- [17] Sadrey, M. (2009). [V-N Diagram](#). Online [Oct 2017].

# Formulación de una metodología para la Restauración Ecológica en ríos afectados por la minería de carbón. Caso de estudio río Lili, Cali.

Miller Cano A.<sup>1</sup>

Jhoan Popo V.<sup>2</sup>

Javier E. Holguín G.<sup>3</sup>

Universidad Autónoma de Occidente  
Cali – Colombia

Este capítulo presenta los principales aspectos que se deben tener en cuenta para la restauración ecológica de ecosistemas acuáticos superficiales afectados por actividades mineras tomando como base la microcuenca del río Lili del municipio de Cali, buscando la integración de factores económicos, sociales, técnicos y ambientales. Se investigó el problema de la contaminación en un tramo de estudio de 300 metros el cual es una delimitación del río entre dos puntos seleccionados, este tramo fue elegido debido a su alto nivel de deterioro ocasionado por los vertimientos presentes en la zona, conocidos como drenajes ácidos, los cuales se generan por la lixiviación de sulfuros de hierro presentes en el carbón, desde hace aproximadamente 50 años. En busca de un método alternativo e innovador, que involucre a la comunidad de la zona como un medio de culturización ambiental, se ha planteado la formulación de una propuesta de restauración ecológica que al aplicarse permita mejorar las condiciones del lugar y así mitigar el daño generado por las actividades mineras.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las actividades antropogénicas han alterado el comportamiento y dinámica del ambiente, generando impactos negativos, entre ellos el deterioro de ecosistemas terrestres y acuáticos. En relación con lo anterior, la explotación minera es una actividad que tiene gran cantidad de problemas asociados a la afectación del medio natural [1], específicamente en la extracción de carbón los impactos más significativos están relacionados directamente con los drenajes ácidos de minas, que son los efluentes tanto finales como de relave cuya principal característica es su elevada acidez. Este contexto muestra la necesidad de realizar estudios que permitan comprender los drenajes ácidos, desde su formación en la mina hasta su comportamiento asociado al transporte y dispersión en las fuentes hídricas.

El río Lili, es una de las fuentes superficiales de agua del municipio de Santiago de Cali, que se ha visto afectado significativamente por los procesos de extracción de carbón que se realizan en las minas del sector [2]. La explotación minera de carbón en la cuenca del río Lili inició aproximadamente hace 50 años, periodo en el cual la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) junto con la policía municipal intervinieron con el fin de terminar con la minería ilegal en esta zona. Algunas de estas minas fueron clausuradas por las autoridades, sin embargo, en la actualidad aún existe evidencia de que siguen siendo efectuadas prácticas extractivas de tipo ilegal en este sector y estas minas clausuradas o no, siguen vertiendo de forma continua efluentes ácidos al río Lili [3]. La cuenca del río Lili [4] posee un área de 2.726 hectáreas; limita al norte y occidente con la cuenca del río Meléndez, al sur con la cuenca del río Pance y al oriente con el casco urbano del municipio de Santiago de Cali. El río Lili cuenta con 17 kilómetros de recorrido aproximadamente.

Es de vital importancia la preservación y conservación de los ecosistemas acuáticos, por lo que es necesario optar por alternativas de recuperación que ayuden en la eliminación o disminución de presiones sobre el medio afectado. Cabe resaltar que los procesos de restauración ecológica son llevados a cabo en medios que han sido alterados drásticamente por actividades antrópicas y su objetivo principal es lograr que el ambiente degradado se acerque a condiciones similares al de su estado original, es decir, antes de la intervención humana.

Este trabajo se enmarca en las actividades del Semillero de Investigación en Gestión Integrada del Recurso Hídrico de la Universidad Autónoma de Occidente, en la línea de estrategias para la prevención y el control de la contaminación y la restauración ecológica del recurso hídrico.

## 2. MÉTODO

En la formulación de la metodología de restauración ecológica del río Lili, el proyecto se dividió en 3 fases en el siguiente orden.

### 2.1 Identificación de las metodologías de restauración ecológica

Se indagó en las restauraciones ecológicas implementadas alrededor del mundo, ciertas características compatibles con la situación actual del río Lili, entre las que está: la inclusión de procesos de mejora de la calidad del agua y suelo, de igual manera, que la zona de implementación del proyecto se viera afectada por algún tipo de minería o en su defecto por alguna actividad que cause impactos similares a los de extracción de recursos, y por último, que los

---

<sup>1</sup> canoarango9@gmail.com

<sup>2</sup> jhoan.popo@uao.edu.co

<sup>3</sup> jeholguin@uao.edu.co

resultados obtenidos en la finalización de esos proyectos hayan sido calificados como exitosos en todos los puntos de su metodología. Esto permitió extrapolar información obtenida en el desarrollo y culminación de los procesos para una óptima formulación de la metodología aplicable en el río Lili en particular.

## 2.2 Diagnóstico de la situación actual del río Lili

Se realizó un diagnóstico de la situación del río Lili en términos de variables hidrobiológicas, fisicoquímicas e hidromorfológicas en un tramo del río, mediante recorridos en la zona de estudio para reconocer exactamente los tramos más afectados por los vertimientos mineros y a la vez realizar tomas de muestras del agua con el objetivo de analizar su estado y determinar su calidad. La determinación de los respectivos parámetros fisicoquímicos e indicadores biológicos de calidad de agua, como lo son los macroinvertebrados, se realizaron en 2 puntos específicos de la zona, antes y después de los vertimientos mineros. Se utilizó el índice de Calidad de Agua (ICA) de la National Sanitation Foundation de Estados Unidos (NSF) ICA-NSF [5], el índice biological monitoring working party (BMWP) adaptado para Colombia BMWP-Colombia [6], ficha hidromorfológica, instrumentos de medición In situ.

## 2.3 Determinar metodología de restauración ecológica aplicable al río Lili

Para el caso específico del río Lili, fue necesario el diseño de una metodología de restauración ecológica que tuviera en cuenta los diferentes problemas que presenta la microcuenca, cómo los vertimientos ácidos de las minas de carbón concurrentes en el sitio identificadas como las tensionantes del sector. Para ello, mediante la indagación de literatura que brindó información de casos similares al del río Lili, se formuló una propuesta aplicable al contexto de la zona mediante la extrapolación de la información en conjunto con los datos obtenidos a lo largo del estudio. Esta propuesta busca involucrar a la comunidad aledaña a la microcuenca, a las entidades ambientales encargadas y a personas con conocimiento sobre temas de restauración ecológica con el fin de brindar la mejor respuesta para la reducción de los problemas de contaminación minera del río Lili.

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con base en las indagaciones de literatura realizadas, principalmente, las guías técnicas para la restauración ecológica de los ecosistemas de Colombia [7] y la información recolectada de calidad del agua de la microcuenca, fue posible establecer una propuesta de restauración ecológica propia del río Lili. Los procesos de restauración ecológica se basan en una metodología definida, la cual requiere de adiciones o modificaciones de procesos dependiendo de lo que se desee remediar, el nivel de contaminación que presente el cuerpo a restaurar y el contexto en general de la zona.

### 3.1 Datos recopilados

En la Figura 1 se observa el esquema en vista superior del tramo de estudio, el cual presento la mayor afectación por los drenajes ácidos de manera continua. En los resultados de campo y laboratorio se evidenció que la Quebrada 1 no presenta contaminación por drenajes ácidos de minas, por lo que el caudal que aporta al río Lili sirve para amortiguar los impactos generados por los 3 vertimientos ácidos en secuencia al inicio del tramo.

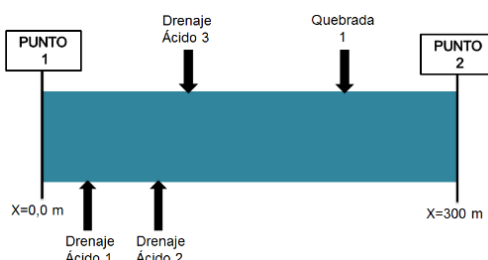


Figura 1. Esquema superior del tramo de estudio

En la Figura 2 se presenta el registro fotográfico del Punto 1 ubicado en la cuenca media del río Lili donde se realizaron los muestreos fisicoquímicos, hidrobiológicos e hidromorfológicos.



Figura 2. Punto 1 en tramo de estudio

En la Tabla 1 se muestran los datos in situ de los vertimientos ácidos provenientes de las bocaminas, con el fin de observar las condiciones en las que ingresaban al río Lili, para estimar si se estaba generando un daño significativo al río (Figuras 3 a 5).

**Tabla 1.** Parámetros fisicoquímicos vertimientos

Parámetro	Drenaje ácido 1	Drenaje ácido 2	Drenaje ácido 3
pH (unidades)	3,70	3,36	3,65
conductividad (µS/cm)	512	438	399
T (°C)	22,9	24,7	23,1



**Figura 3.** Drenaje ácido 1



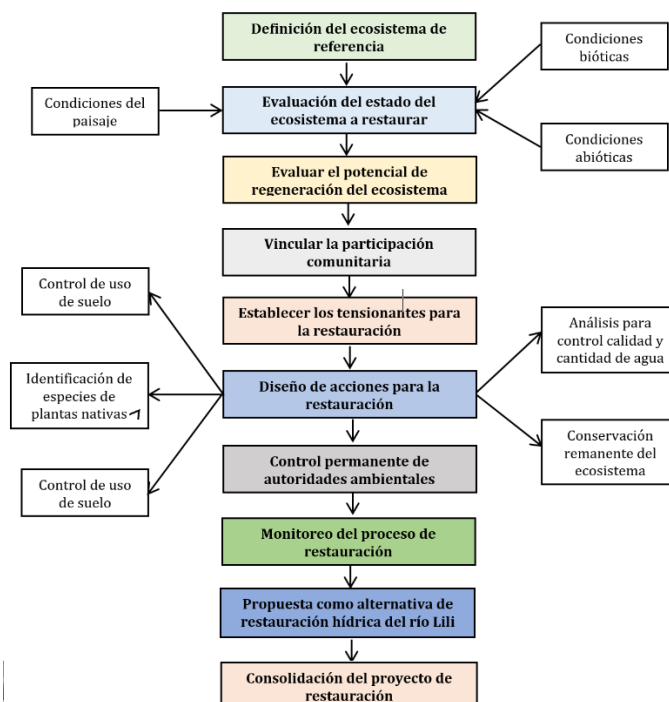
**Figura 4.** Drenaje ácido 2



**Figura 5.** Drenaje ácido 3

### 3.2 Metodología de restauración ecológica aplicable al río Lili

En la Figura 6 se presenta el marco metodológico propuesto en esta investigación para realizar la restauración ecológica en ríos afectados por la minería de carbón.



**Figura 6.** Diagrama de flujo metodológica

1. *Definición del ecosistema de referencia.* El ecosistema de referencia es el modelo en el cual se basa para el diseño de la propuesta de restauración ecológica. Con el fin de obtener una idea de cómo era el estado del medio antes de los acontecimientos mineros que degradan la zona, se realiza investigaciones de la literatura, de los registros de calidad de agua de las autoridades ambientales, indagaciones a personas nativas del área y fotografías históricas del lugar. Todo lo anterior se efectúa para establecer cuánta contaminación, deforestación, erosión y calidad del recurso hídrico que tenía la zona antes de las intervenciones antrópicas y así poder tener una visión parcial de lo que se quiere lograr con la restauración. También se busca obtener información de la ausencia o presencia de vegetación y especies animales que actualmente no están en la zona, ya que fueron desplazados o eliminados por la actividad minera. Este es el primer paso en el proyecto de restauración ecológica. Toda la información recolectada de la zona, serán la base para determinar el grado de afectación que tiene el medio con respecto a su estado en el pasado.
2. *Evaluación del estado actual del ecosistema a restaurar.* En este paso se hace una evaluación de las condiciones actuales del sitio, esto con el fin de determinar el grado de degradación del lugar y así, tener la base para crear la mejor forma de tratar los problemas generados por la contaminación minera. En la evaluación del lugar se examinan los siguientes factores determinantes que ayudan en la interpretación de la problemática mediante las visitas a campo y el reconocimiento del entorno.
  - *Condiciones del paisaje:* 1) Los parches o zonas desérticas que se ocasionaron a causa de las actividades extractivas y sus respectivos vertimientos, las cuales se determinaron mediante visitas y recorridos en campo. 2) El uso del suelo actual que presenta el lugar donde se generaron las actividades mineras.
  - *Condiciones bióticas:* 1) Tipos de especies presentes actualmente, dinámica de la vegetación (tiempo de crecimiento, resistencia a la acidificación, tiempo de vida, entre otros). 2) Fauna nativa presente en el sitio. 3) Biota del suelo.
  - *Condiciones abióticas:* 1) Condiciones del suelo y agua, valoración de parámetros fisicoquímicos, contaminación, nivel freático. 2) Flujo de agua superficial, hidrodinámica estacional, hidromorfología.
3. *Evaluar el potencial de regeneración del ecosistema.* Este apartado es de gran importancia en el desarrollo de la metodología de restauración ecológica. Hace referencia principalmente a la disponibilidad de especies nativas presentes en la región, es decir, la ubicación, abundancia y su etapa sucesional que de alguna manera ayudan a regenerar el ecosistema. En el momento de obtener esta información se plantean programas de restauración que involucren las especies.
4. *Vincular la participación comunitaria.* La restauración ecológica es una actividad con diferentes escalas espaciales y temporales, en las cuales los disturbios antrópicos juegan un papel importante en cualquier escala. La pérdida de los servicios ambientales del ecosistema es también una alerta que debería importar a las personas y más a aquellas que son locales de la zona. Por tal motivo, es importante que las personas participen del proyecto desde la formulación, de esta manera es posible garantizar su continuidad y consolidación.

Es importante verificar si el proyecto restaurativo del ecosistema sobre las comunidades locales será aceptado. En este contexto es necesaria la vinculación de la comunidad para así propiciar los esfuerzos de la restauración, siendo estas personas partícipes activos de todas las etapas dinámicas del proceso. Un plus de esta vinculación sería la adquisición de una conciencia y/o una cultura ambiental por parte de las personas colaboradoras. Las comunidades participan activamente en las etapas de plantación, propagación y cuidado de especies vegetales plantadas, en contribución con el mejoramiento activo de la microcuenca del río Lili. Estas personas conocen mucho mejor toda el área de estudio, sus sugerencias, dudas y aportes serán de suma importancia en el desarrollo del proyecto.
5. *Establecer los tensionantes para la restauración.* Las tensionantes o barreras son todos aquellos factores que limitan o desvían la sucesión natural del ecosistema, por tal motivo deben ser removidos para que así el medio pueda restaurarse. Los principales tensionantes presentes en la zona son los ocasionados por los vertimientos que aún siguen escurriendo de las minas de carbón debido a que no fueron clausuradas técnicamente y por presiones sociales, tales como:
  - Infertilidad del suelo en contacto con los vertimientos mineros.
  - Acidificación del agua del río Lili.
  - Acumulación de metales pesados en el agua a causa de los efluentes ácidos de las minas.
  - Afectación de las especies vegetales y animales a causa de la contaminación minera.
  - Fragmentación del paisaje a causa de zonas desérticas.
  - Contaminación del suelo por residuos procedentes de la extracción de carbón.
  - Contaminación de la fuente superficial hídrica por residuos procedentes de la extracción de carbón.
6. *Diseño de acciones para la restauración.* Esta fase está encaminada en la eliminación de aquellos factores tensionantes que impiden la sucesión ecológica del lugar. Según la metodología planteada por Vargas [5], el diseño de estrategias que contribuyan a la eliminación de las barreras tensionantes sugiere 5 categorías o conjunto de acciones en las cuales se puede catalogar el tipo de restauración a realizar, estas categorías son:



- Basadas en la remoción y control de los tensionantes leves.
- Basadas en la adición de especies.
- Basadas en la regulación de la tasa de procesos ecosistémicos.
- Basadas en la remoción de los tensionantes severos.
- Basadas en la regulación de las fuentes de entradas de energía.

El río Lili clasifica en la categoría 4, remoción de tensionantes severos, esto se debe a la información recopilada del estado de la zona y los problemas asociados a los vertimientos ácidos de minas que presenta. En este orden de ideas las posibles acciones a realizar en contribución con la sucesión del lugar son:

- *Control de uso del suelo:* El suelo de la zona afectada no puede seguir siendo apto para la aplicación de actividades extractivas no-tecnificadas, velando por su protección. Para que la restauración ecológica sea efectiva, toda aquella relación existente con los procesos de minería debe ser invalidada y clausurada del lugar.
- *Análisis para control calidad y cantidad de agua:* Realizar análisis de calidad y cantidad de agua según los parámetros físicoquímicos establecidos por el ICA, para así generar un diagnóstico de la gravedad de los impactos relacionados con las actividades mineras antes, durante y después de la implementación, con el fin de tener un referente para la planificación de los procesos de restauración.
- *Identificación de especies de plantas nativas que contribuyan a la biorremediación del lugar:* Con el fin de obtener una solución viable para el caso de contaminación del río Lili en términos de pH ácidos por la oxidación de sulfuros de hierro en el agua, se propone el uso de plantas nativas de la zona que tengan propiedades de asimilación de metales pesados. Para eso, primero se propone que se colecten algunas especies de plantas vasculares de la microcuenca y que se evalúe su potencial de asimilación de contaminantes con ayuda del Herbario CUVV de la Universidad del Valle. Posteriormente se plantea el uso como fuente fitorremediadora en las zonas afectadas. Al contar con la información de las especies vegetales que ayudan a la sucesión natural del medio, se procede a la formulación de propuestas de plantación, tales como el tipo de sembrado, la distancia de siembra entre plantas, la distancia de siembra entre plaza y río, frecuencia de riego, entre otras. La restauración ecológica es un proceso complejo que requiere la intervención multidisciplinaria, por ello, para este apartado será necesario la colaboración de personal capacitado en el área de la biología - botánica.
- *Conservación remanente del ecosistema:* Se hace cerramiento del ecosistema remanente, es decir, una especie de delimitación física que separe el medio a recuperar de todas aquellas posibles actividades que puedan interferir con el proceso de restauración. Para ello, se puede utilizar cercas vivas de aislamiento.
- *Cierre técnico de bocaminas:* El cierre y abandono de las bocaminas es una actividad que se debe realizar al momento de concluir la fase extractiva (Art. 95 Ley 685 de 2001) [6], lo cual indica la obligación de su desarrollo por parte del consenso minero. El proceso de cierre y abandono es uno de los más importantes y el cual debe ser contemplado antes de cualquier solicitud de aceptación de cualquier proceso de explotación. Una buena forma de tratar con los vertimientos que aún siguen saliendo de las bocaminas y llegando a las aguas del río Lili es mediante la implementación de canales capaces de redirigir los efluentes de las minas a un sitio específico donde pueda ser debidamente tratado mediante bacterias sulfato reductoras o mediante el encapsulamiento del material ácido. El cierre técnico de las bocaminas es crucial para disminuir el impacto ambiental luego de que la mina es cerrada, si bien, el impacto sobre la zona a extraer es masivo, pero la falta de una debida clausura contribuye a un deterioro a largo plazo.

7. *Control permanente de autoridades ambientales.* En los recorridos efectuados en la microcuenca del río Lili, se observó la presencia de personas que actualmente siguen practicando la minería artesanal a la ribera del río Lili. Todo esto se debe a que las autoridades ambientales encargadas no hacen un control permanente en toda la zona afectada por las bocaminas, lo que facilitó la continuidad de las actividades de extracción del carbón. Es de suma importancia realizar visitas constantes de campo en la microcuenca del río por parte de las autoridades ambientales, para este caso particular, le corresponde a la CVC en acompañamiento con la policía local, con el fin de verificar que no se sigan presentando este tipo de actividades extractivas que están generando impactos en los elementos del ecosistema como lo son el agua, suelo y aire.

8. *Monitoreo del proceso de restauración:* En este proceso de restauración ecológica, el desarrollo del monitoreo consistirá en el seguimiento y evaluación continuo de los cambios experimentados por el ecosistema gracias a la restauración realizada. Con esta medida se verificará que efectivamente los procesos de restauración se están efectuando y por ende será un indicador del éxito de esta práctica. Esta fase también brinda información del medio de trabajo para la aplicabilidad de la restauración ecológica en diferentes contextos mediante la modificación de factores determinantes en cada diseño de la propuesta de restauración ecológica. Mediante esta fase es posible la modificación de algunos de los procesos de la restauración en caso de que los resultados sean negativos o indeseables, en caso de ser positivos, el trabajo seguirá y se continuará evaluando su progreso.

9. *Propuesta como alternativa de restauración hídrica del río Lili:* De acuerdo con el diagnóstico de la zona de estudio, los vertimientos ácidos de las minas son el principal factor tensionante que contribuyen a la degradación de la microcuenca del río Lili. Es por este motivo que se plantea una forma ecológica de mitigar los impactos generados sobre el cuerpo hídrico, con el fin de mejorar las condiciones de la zona afectada por dichos vertimientos.

La alternativa consiste en el diseño de un humedal construido de flujo superficial, el cual es uno de los métodos de tratamiento pasivo más utilizados, su objetivo principal es la supresión de la acidez, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de los sólidos en suspensión. Esto se logra cambiando las condiciones de Eh y pH del afluente de forma que se favorezca la formación de especies insolubles capaces de precipitar y retener la carga contaminante. Por lo general, en los sistemas pasivos se recurre al uso de material alcalino para neutralizar la acidez, a sustratos orgánicos para crear ambientes reductores y al empleo de bacterias para catalizar las reacciones y acelerar los procesos que forman precipitados. En el diseño y la configuración del tratamiento se debe asegurar una buena circulación y distribución del afluente dentro del sistema, con el fin de maximizar el tiempo de contacto entre el flujo de agua contaminada con los elementos y materiales que componen la estructura del tratamiento [8].

Los principales actores son la vegetación endémica de la microcuenca y el suelo de la ribera del río como el sustrato, lo que permite conservar las características de un proceso ecológico de restauración para tratar los drenajes ácidos y el río Lili en búsqueda de la reducción de la contaminación generada por los drenajes. De acuerdo con lo anterior, se debe hacer la colecta e identificación de las especies de plantas vasculares (que posean fruto y/o flor para su identificación) endémicas y predominantes de la microcuenca con ayuda del Herbario de la Universidad del Valle. Una vez detalladas las plantas, se procede con la revisión de literatura que permita conocer información relevante sobre las plantas y así, posteriormente, proceder con la realización de experimentos controlados para cada una con el fin de determinar la capacidad de absorción de contaminantes presentes en el río. La idea principal es realizar la estructura del humedal de flujo horizontal en el inicio del tramo con más afectación, que cuenta con el espacio adecuado para su instalación. El humedal debe quedar adecuado con el sustrato del sector que ya está acoplado con las condiciones de la zona y que a su vez permite el crecimiento de las plantas que se utilicen para la remoción de contaminantes.

El humedal permitiría tratar el agua del río Lili que ya viene afectada por la actividad extractiva del carbón desde la cuenca alta en conjunto con los drenajes ácidos que se presentan en la cuenca media establecidos en el tramo de estudio enfocado en la eliminación de sulfuros de hierro. Actualmente en la Universidad Autónoma de Occidente se cuenta con un humedal de flujo horizontal (Figura 7) el cual fue resultado de un proyecto de investigación que recientemente finalizó. La idea es continuar esta investigación con otro proyecto de tesis de pregrado o postgrado en el que se utilice esta infraestructura, para continuar con la investigación de restauración hídrica basada en humedales en ríos afectados por minería de carbón. Se propone realizar un estudio a escala real en este humedal para evaluar las eficiencias en la disminución de la acidez del agua del río Lili, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de los sólidos en suspensión, empleando vegetación endémica de la microcuenca y el suelo de la ribera del río como el sustrato.



**Figura 7.** Humedad horizontal construido en la Universidad Autónoma de Occidente para realizar investigación en la tratabilidad de aguas residuales domésticas o industriales o efluentes de minería

10. *Consolidación del proyecto de restauración.* La consolidación de un proceso de restauración implica la superación de todos los tensionantes que impedían la sucesión del ecosistema y que ahora este tiene una dinámica natural positiva. Las acciones de monitoreo y evaluación deben de indicar que el proceso marcha satisfactoriamente y el ecosistema empieza a mostrar variables de autosostenimiento, tales como el enriquecimiento de especies, recuperación de la fauna, restablecimiento de servicios ambientales, entre otros. Al llegar a este punto, se da como exitoso todo el planteamiento, diseño, planificación e implementación del proceso de restauración ecológica para el contexto del río a trabajar.

#### 4. CONCLUSIONES

Toda la investigación realizada en el río Lili fue utilizada para la formulación de un marco metodológico de restauración ecológica aplicable al río, además, es una forma actualizar la información existente sobre el ecosistema y contribuir a los posibles proyectos en pro del beneficio ecosistémico del mismo. Con el desarrollo de esta tesis se abren varias puertas en el ámbito investigativo del sector, los problemas de drenajes ácidos de minas de carbón en la zona son una de las principales causas de la contaminación del río Lili, por ello, es necesario la formulación de proyectos que ayuden a la restauración del medio y al control de este tipo de vertimientos sobre el cauce del río y el ecosistema aledaño.

De las metodologías de restauración ecológica aplicables para ecosistemas acuáticos superficiales afectados por la minería de carbón revisadas se encontró que en gran porcentaje las metodologías sólo se enfocaban en la remediación de los suelos y no mezclaban el recurso hídrico, por lo que fue más complejo encontrar elementos claves que se pudieran extrapolar para aplicarlos en el río Lili

En Colombia existen varios casos similares al del río Lili, por eso, se buscó una metodología que pudiera aplicarse claramente al contexto del río Lili. Aun así, con algunos pequeños cambios esta metodología puede ser adaptable a otro río con características y condiciones similares al del río Lili y al tener ya diseñada esta propuesta de restauración, es posible usarla como base para futuros proyectos que busquen mejorar los servicios ecosistémicos de un cuerpo de agua determinado.

El diagnóstico de la situación actual del tramo del río Lili afectado por la minería de carbón, en términos de variables hidrobiológicas, fisicoquímicas e hidromorfológicas, permitió identificar que el impacto más significativo producto de la minería de carbón es el conocido como efecto caparrosa que es un producto de los sulfatos de hierro, lo que indica una fuerte acumulación de metales pesados en el agua. Las familias de macroinvertebrados presentes en el río, corroboraban el mal estado de la microcuenca.

## REFERENCIAS

- [1] Suárez, G. (2011). Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia. *Opinión jurídica* 10(20), 123-140.
- [2] Gonzalez, L. (2011). [Extinción forestal y crisis del agua consecuencias del mal manejo de las cuencas hidrográficas](#). Online [Nov 2017].
- [3] Personería municipal de Santiago de Cali (2013). [Informe sobre el estado del recurso hídrico en el municipio de Santiago de Cali 2013](#). Online [Nov 2017].
- [4] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2007). Balance oferta – Demanda de agua superficial, Cuenca Río Lili.
- [5] Torres, P. et al. (2010). Aplicación de índices de calidad de agua – ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. *Ingeniería e Investigación* 30(3), 86-95.
- [6] Roldan, G. (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Propuesta para el uso del método BMWP/Colombia. Universidad de Antioquia.
- [7] Vargas, J. et al. (2012). Guías técnicas para la restauración ecológica de los ecosistemas de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- [8] Corte Constitucional. Art. 95 Ley 685 de 2001. Código de minas.
- [9] López, P. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: Estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín geológico y minero* 113(1), 3-21.

# Sistema de logística verde para la recolección de residuos sólidos en el sector centro sur de Bogotá

Juliet N. Ramos G.<sup>1</sup>  
Corporación Universitaria Minuto de Dios  
Bogotá – Colombia

Este proyecto surge con la necesidad de incentivar en las madres cabeza de familia del sector de patio bonito de Bogotá, la creación de empresa y el cuidado del medio ambiente, razón por la cual evidenciamos que la comercializadora de reciclaje era una buena opción. El apoyo de la comunidad surge como respuesta al papel que juega el reciclaje en la conservación y protección del ambiente, por lo tanto, es fundamental la apropiada planeación y ejecución de programas educativos sobre el tema y la puesta en práctica de acciones concretas en pro del mismo, además es una solución sostenible a un problema económico de esta población debido a que por medio de la venta de estos materiales genera un ingreso que les permite el auto sostenimiento de sus familias. El correcto uso de los recursos naturales de un país depende en gran parte de su nivel de educación ecológica, por lo que se convierte en una necesidad apremiante la realización de un programa pertinente y permanente de reciclaje. El programa de logística verde ofrece la posibilidad de contribuir con el medio ambiente, el ahorro de energía, la conservación de recursos naturales, entre otros. Reciclar permite disminuir la contaminación, ayuda a que sea más fácil la recolección de basuras y que el entorno permanezca más organizado y adecuado para la salud. Si lo evaluamos desde un punto de vista económico el programa de logística verde ofrece la posibilidad de recaudar fondos básicos para el sostenimiento de las madres y su núcleo familiar, que les permitirán suplir gastos académicos y empresariales, generando sentido de pertenencia con el programa, la fundación y el medio ambiente. La implementación de este programa servirá de herramienta de sustento sostenible en el tiempo para comunidad, con la cual se espera transmitir el interés por proyectos empresariales verdes que incentiven no solo a otras madres, también a futuros jóvenes emprendedores través del aprovechamiento de ventajas competitivas que permitan el rápido posicionamiento en el mercado. Por tal razón, este trabajo pretende contestar a la pregunta ¿Cómo podemos generar un programa de logística verde que permita el aprovechamiento de residuos sólidos antes de su disposición final incentivando el cuidado del medio ambiente, empleo sostenible e ingresos estables a madres cabeza de familia y sus hogares del sector sur centro de la ciudad de Bogotá?

## 1. INTRODUCCIÓN

La logística verde o ecológica se está consolidando como una tendencia que nace de la sensibilidad que tiene el ser humano frente a su ecosistema y la manera en que las empresas, gobiernos y personas se involucran simultáneamente. Según Michael J. Polonsky, la logística verde se puede definir como un conjunto de actividades diseñadas para generar y facilitar cualquier intercambio de bienes y servicios que permitan satisfacer las necesidades del ser humano a través del cuidado y protección del medio ambiente. En la actualidad, el incremento de mercancías y productos ha sido notable, entendido por una insatisfacción de las necesidades del hombre, y al existir un aumento de mercancías y productos, se eleva el número de desechos. Muchos de éstos resultan muy perjudiciales para el medio ambiente, la salud humana y animal, por esta razón las sociedades modernas con ayuda de los ecologistas, han iniciado una fuerte campaña a favor del reciclaje.

Es de vital importancia tener en cuenta que en todas las actividades humanas y en los diferentes espacios como el hogar, el colegio, el trabajo y los lugares de recreación, se generan desechos que pueden ser recuperados y transformados mediante procesos específicos. Reciclar es un proceso simple que nos puede ayudar a resolver muchos de los problemas creados por la forma de vida moderna. De esta manera la elaboración de un programa de logística verde con miras a la creación de una empresa de reciclaje, aparte de actuar en beneficio de la humanidad y la preservación del medio ambiente, es también un negocio muy rentable para la comunidad.

## 2. CONTEXTO

En los últimos tiempos el mundo ha enfrentado una serie de cambios, a causa de la inminente globalización que se ha venido desarrollando. A su vez, esto ha traído una serie de cambios en las organizaciones modernas que han impulsado una nueva cultura organizacional, que tiene un efecto directo en la manera de producir y en el manejo de materias primas y terminadas, todo esto acompañado por una parte importante del proceso que es el manejo que le han venido dando a los residuos industriales, los cuales nunca habían sido de gran importancia para las compañías y que por años no habían tenido un control serio ni responsable sobre estos, generando grandes pérdidas y perjuicio para el medio ambiente.

Si vemos hacia el futuro Latinoamérica se convertirá en una de las grandes potencias del reciclaje, debido al significativo número de pequeñas empresas que están naciendo, especializadas en el tema, sin embargo esto contrasta con la realidad local de ciudades como Bogotá, que debido a la inexistencia de una autoridad competente en el tema

---

<sup>1</sup> [jramosga@uniminuto.edu.co](mailto:jramosga@uniminuto.edu.co)

que pueda ejecutar una labor de vigilancia y orientación, los ciudadanos arrojan todos los residuos sin ninguna discriminación a ríos y a botaderos de basura, sin tener en cuenta las grandes consecuencias que esto puede traer. Es evidente que algunas alcaldías locales han venido realizando un esfuerzo sobresaliente por medio del plan maestro de manejo integral de los residuos sólidos en Bogotá, que como primera contribución ha construido el primer parque de reciclaje, el cual tiene como finalidad que las personas en la ciudad separen los residuos, el material reciclable que allí llevan, se recolecta de casa en casa por los camiones denominados vehículos de la Ruta de Recolección Selectiva, que pasa por 302 barrios de Bogotá, distribuidos en 16 de sus localidades, en donde aún no están incluidas la localidad de Usme, Sumapaz, Bosa ni Santa Fe. El objetivo de esta ruta es recoger única y exclusivamente el material reciclado puerta a puerta, en el horario acordado con cada usuario, que cubre de lunes a sábado e incluye los cuatro operadores del servicio de aseo de la capital colombiana [1], pero aun así todos los años de descuido que tuvieron las alcaldías locales, han hecho que estemos enfrentando unos graves problemas en el manejo de residuos, que trae como consecuencia directa un desperdicio de gran cantidad de material reciclable, el cual se pierde entre los desperdicios orgánicos que terminan en los grandes botaderos de basura de la ciudad.

La disposición final de residuos, que es inherente a todas las actividades sociales y productivas de un municipio o ciudad, es crítica en casi toda Colombia debido a que, por la ausencia de un plan de gestión, estos residuos son arrojados en fuentes de agua o en botaderos a cielo abierto. De ahí que la recolección de residuos implica en las ciudades contar con un sistema de recolección apropiado, así como de transporte de los residuos. La carencia de este ha originado sistemas paralelos e informales a los sistemas de aseo. En el Distrito Capital, las actividades de recuperación, recolección y transporte de residuos, están ubicados principalmente en el sector informal teniendo una importancia económica y ambiental bastante buena, pero sujeta al estigma y discriminación social por su relación con los habitantes de la calle. La Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos (UESP), promovió la realización de un profundo informe a partir del conocimiento de la cadena de reciclaje [2]. Para esto, se tomaron tres componentes claves:

- Las unidades económicas encargadas del acopio, comercialización y pre transformación de materiales reciclables
- Las organizaciones de recicladores
- La población de recicladores.

Según el censo que realizó La Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos en 2013 existen 13.771 recicladores asentados los cuales se muestran en la Tabla 1 discriminados por localidad, y el total de personas que dependen de esta actividad es de 21.676; de los recicladores el 58% tienen como máximo educación primaria, el 17.3% son analfabetas, los hogares recicladores tienen 5 personas a cargo cuando en promedio para Bogotá es de 3.5 máximo [3] por barreras o dificultades para la gestión de conocimiento en un contexto determinado.

**Tabla 1.** Recicladores por Localidad

	Localidad	De recicladores	%
17	La candelaria	8	0,1
13	Teusaquillo	49	0,4
15	Antonio Nariño	74	0,5
2	Chapinero	100	0,7
1	Usaquén	370	2,7
6	Tunjuelito	443	3,2
5	Usme	504	3,7
9	Fontibón	524	3,8
4	San Cristóbal	546	4,0
12	Barrios Unidos	632	4,6
14	Los Mártires	718	5,2
16	Puente Aranda	755	5,5
3	Santafé	766	5,6
18	Rafael Uribe Uribe	870	6,3
7	Bosa	948	6,9
10	Engativá	957	6,9
19	Ciudad Bolívar	1348	9,8
11	Suba	1431	10,4
8	Kennedy	2728	19,8
	Total	13771	100,0

En cuanto a la composición del sexo de los recolectores el 69,9% que realizan este oficio son de sexo masculino y el 30,10% son de sexo femenino en su mayoría madres cabeza de familia como se muestra en la Tabla 2 y 3 [3].

**Tabla 2.** Composición del sexo de los recicladores

	F	M
No.	4145	9626
%	30,10	69,90

**Tabla 3.** Composición familiar

		%
Cabeza de familia	9467	68,75
No es cabeza de familia	4304	31,25

Hasta inicios de 1990 no se notaba una organización de este gremio, pero desde esa fecha empezaron a agruparse constituyendo la Asociación Nacional De Recicladores [4]. A la fecha se calcula que son 300.000 personas agrupadas en 50.000 familias en todo el país. De ese total, 15.000 familias se encuentran en Bogotá el resto en ciudades medianas y grandes.

### 3. MÉTODO

Para la metodología del proyecto se desarrollarán las siguientes fases:

- Recopilación de información general enfocada al proyecto.
- Análisis de la información y determinación del sistema logística verde.
- Desarrollo de estudios técnicos, financieros, organizacionales, ambientales y legales.

El sistema de logística verde se desarrolló en el semillero LOGIFUS de la Corporación Universitaria Minuto de Dios con asesoría de una Fundación sin ánimo de lucro a quienes se les manifestó el interés por conocer la rentabilidad y el beneficio social que puede ofrecer el ejercicio del reciclaje, momento desde el que se comenzó a investigar la disposición de la comunidad del sector de Patio Bonito de la ciudad de Bogotá, lugar en donde se genera la mayor actividad de reciclaje y a la vez de generación de desechos sólidos. Por esta razón se realizó una encuesta para determinar la población con la que se va a desarrollar el proyecto arrojando los siguientes datos de entrada (Tabla 4).

**Tabla 4.** Datos de entrada de la encuesta

Población por encuestar	25 mujeres del sector sur centro localidades (Bosa, Fontibón y Kennedy)
Muestra	Muestra: La muestra que se tomó fueron 80 Estudiantes, calculados con un nivel de confianza de 95% y un margen de error del 5%
Tipo de encuesta	Tipo de encuesta: Cuantitativa y cualitativa

Las localidades de Bosa, Kennedy y Fontibón están ubicadas en el sector centro sur de la ciudad de Bogotá (Figura 1), estas son consideradas como unas de las localidades con mayor porcentaje poblacional (Kennedy 1.500.000, Fontibón 345.909 y Bosa 508.828 habitantes) y un porcentaje de generación de residuos de 6.3%, 18.75% y 4.34% respectivamente, por lo cual se decide establecer el proyecto en dicho sector, inicialmente se le dará tratamiento de pequeña empresa para el proyecto con un total de 20 colaboradores máximo.



**Figura 1.** Mapa de localidades de Bogotá

Las ventajas competitivas son:

- Se cuenta con la ayuda de profesionales (colaboradores de la fundación, estudiantes y docentes de Uniminuto), como supervisores para la asesoría en la creación y puesta en marcha de la recicladora.
- Ubicación estratégica, la bodega se ubicará en el barrio patio bonito ya que es un punto geográfico central con vías de acceso a cualquiera de las tres localidades en donde se ubican nuestros principales proveedores, competidores y compradores.
- La inversión inicial del proyecto no requiere de grandes desembolsos en maquinaria, equipos e instalaciones locativas.
- Establecer un sistema de calidad, brindando asesoría técnica gratuita a todos los posibles colaboradores del proyecto.

### 4. ANÁLISIS DEL SECTOR

Tal como lo señala la Comisión V del Senado de la República, las siguientes cifras demuestran la gravedad del problema de los residuos en Colombia, por ejemplo: en 1994 se producía 14.000 toneladas diarias de residuos, en 1998 más de 22.000, en el 2004 la cifra ascendió a 27.300 toneladas y en la actualidad se generan 32.200 toneladas diarias de las

cuales 8.500 son producidas en Colombia con un porcentaje del 26% [5]. De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) el 44% de los hogares clasifican los residuos. Aunque este porcentaje es alto en apariencia, si esta separación fuese adecuada, los 10,1 millones de hogares que tiene el país generarían alrededor de 4,7 millones de toneladas al año, de los cuales se podrían aprovechar cerca de 2,4 millones de toneladas, incluido el tratamiento de orgánicos seleccionados y los niveles de aprovechamiento del país estarían muy de cerca del 20% actualmente [6].

Para aumentar el nivel de separación en la fuente, el país ha adoptado medidas como: i) la norma GTC 24:3 del año 2009 Guía para la separación en la fuente; ii) la obligatoriedad de la separación en la fuente establecida en el Título 2 del Decreto 1077 de 2015; iii) campañas educativas en los niveles municipales y por parte de operadores y sector productivo; y iv) incentivos a la separación en la fuente como el definido recientemente en el marco tarifario de aseo, Resolución CRA 720 de 2015, el cual corresponde a un descuento de hasta el 4% para los suscriptores de aquellas macro rutas de recolección de residuos aprovechables que tengan niveles de rechazo inferiores al 20% de los residuos presentados. Sin embargo, no existe una campaña intensiva promovida por el Gobierno nacional, similar a las campañas por ahorro de agua o reducción del consumo de energía, que generen un impacto mayor en la mayoría de los ciudadanos. Por otro lado, continuando con la composición de los residuos, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el 30% de los residuos generados está compuesto por materiales con potencial de aprovechamiento como papel, cartón, metal, vidrio, textiles o plástico como se evidencia en la Figura 2. El manejo inadecuado que se está dando a estos residuos y a los productos durante todo el ciclo de vida está causando presión sobre la capacidad de los rellenos sanitarios y desperdiciando materia prima y energía. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, esta problemática se explica por la debilidad de las entidades estatales competentes para hacer seguimiento y monitoreo y para promover la aplicación de políticas, planes y programas que permitan la producción de bienes y servicios con criterios de sostenibilidad. Otro problema relacionado es que los sectores económicos no aplican completamente el análisis del ciclo de vida del producto, debido a que no existen incentivos a hacerlo dada la baja demanda de bienes y servicios con criterios ambientales por parte del consumidor [7].

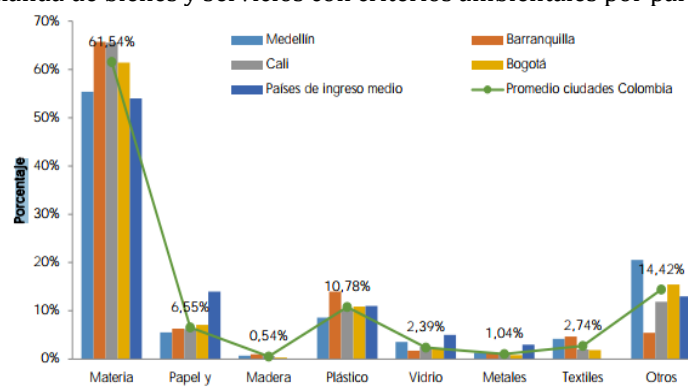


Figura 2. Caracterización de residuos sólidos en Colombia

## 5. ANÁLISIS DE MERCADO

Para entrar a trabajar en la logística verde es de suma importancia tratar sobre el mercadeo verde o ecológico el cual se inicia a raíz de los cambios negativos en el clima y el crecimiento constante de la preocupación frente al deterioro tanto del medio ambiente como de los recursos naturales. La sensibilidad que nace a partir de una responsabilidad social empresarial en la cual el medio ambiente juega una parte importante al igual todos los grupos de interés inmersos en dichos procesos productivos y capitalistas, el mercadeo verde tiende a crecer y a consolidarse como los hábitos de intercambio de productos, bienes y servicios para cubrir las necesidades humanas, pero teniendo en cuenta el indispensable medio ambiente. Para la Asociación Americana de Marketing AMA, este concepto nace en la década de los 80's y lo define como el esfuerzo que hace una empresa para producir, promover, empaacar y recuperar los productos con un enfoque de responsabilidad y sensibilidad ecológica.

Es un tema complejo tratar de cambiar el consumismo en una sociedad capitalista en donde solo importaba la remuneración a entablar políticas que obliguen y regulen las buenas prácticas de manufactura es más las buenas practicas ecológicas desde el seno del hogar todo esto a favor de la huella ecológica que se quiere dejar a las futuras generaciones. Para que dichos cambios se vean reflejados es necesario crear estrategias que estén a favor tanto de la protección y conservación del medio ambiente, teniendo en cuenta lo dicho anteriormente el servicio de reciclaje es un objetivo total del mercadeo verde en donde se reutilizan los residuos sólidos y se cubren otras necesidades que no solo los mismos para los que inicial mente fue usada dicha materia prima. Para algunos autores el mercadeo verde ha tenido tres fases:

- La primera fase ocurre durante los años 60's y 70's, y se denomina Mercadeo verde Ecológico.; esta fase es en la cual se revisa la responsabilidad ambiental que ejercen las industrias, los consumidores y como tal los productos en el mercado, para luego de esto desarrollar normas y regulaciones que deben estar inmersas en los procesos productivos y planes de desarrollo.



- La segunda fase corresponde al Mercadeo verde Ambiental y ocurre en la década de los años 80's. En esta fase el propósito central es generar las buenas prácticas de manufactura o producción más limpia razón por la cual se toman medidas de control frente al uso de los recursos naturales y el uso de tecnología limpia en los sistemas de producción. Por esta razón, se han tomado medidas en los procesos de producción determinadas por el cuidado del medio ambiente, evitando y controlando la polución y las basuras, principalmente. Entran en auge los de grupos de activistas en contra de los daños ambientales generados por productos, empresas y gobiernos.
- La tercera fase consiste en el Mercadeo verde Sostenible y se evidencia durante la década de los 90's muy cerca al cambio de milenio. Esta etapa demuestra el desarrollo más profundo y significativo del mercadeo verde, puesto que contempla una oportunidad sostenible para el consumo y la producción basada en la protección y aumento de los recursos naturales.

El mercadeo verde tiene su nicho en empresas con productos y servicios sostenibles y además de esto con prácticas socialmente responsables. El acceso al mercado de este tipo de empresas con una mentalidad de cuidado y preocupación ambiental es muy rápido y aceptado, generan sostenibilidad, valor agregado y una ventaja sobre todos sus competidores. Una descripción más específica es que un producto o servicio verde es el que es social y ambientalmente responsable. Esto quiere decir que son responsables y respetuosos de los lugares y las personas que los proveen y los usan.

### 5.1 Mercado objetivo

En esta parte del estudio se evaluó la zona de desempeño del proyecto Logística Verde en donde se tuvieron en cuenta las tres localidades a trabajar, gracias a dicha evaluación se puede concretar que son zonas con alta generación de residuos sólidos y gran cantidad de población vulnerable lo cual evidencia que cumplen con las características adoptadas para el desarrollo del proyecto.

### 5.2 Mercado potencial

Según la Alcaldía Mayor de Bogotá, la población en la localidad de Kennedy es aproximadamente de 1'500.000 habitantes, la población en la localidad de Fontibón es aproximadamente de 345.909 habitantes y la población en la localidad de Bosa es aproximadamente de 508.828 habitantes, que entre todas producen aproximadamente 2502 toneladas de basuras diarias. De ahí que el proyecto "Logística Verde" espera conquistar el mercado del reciclaje de esta parte de la ciudad de Bogotá.

### 5.3 Análisis de la demanda

El proyecto ha tenido contacto con empresas afines al sector de reciclaje como son Reciclamas, Papeles el Vergel y la Asociación de Recicladores de Bogotá con las cuales por medio de entrevistas se ha recopilado información valiosa relacionada con calidades, precios de venta y volúmenes requeridos. La inmersión del servicio al mercado se realizará por medio de contacto directo con el cliente a través del área de compras de los mismos a quienes se les llevará una propuesta de precios, distribución y presentación del servicio. En el desarrollo de estas estrategias de mercadeo se cuenta con los siguientes factores:

- Colaboradores: Reconocer a todas aquellas personas que hacen posible el desarrollo del proyecto como son las madres cabeza de hogar, los administrativos y operativos necesarios en el proceso, con el fin de que sea un trabajo mancomunado y con un ambiente cálido de trabajo.
- Competidores: Conocer y analizar a todas aquellas posibles competencias que puedan afectar el desarrollo del proyecto, en nuestro caso Reciclamas, Papeles el Vergel y la Asociación de Recicladores de Bogotá.
- Proveedores: Mantener una excelente relación comercial con proveedores de materias primas menos contaminadas que generan menos labor como son Conjuntos residenciales de Fontibón y Centro Comercial Milenium Plaza.

### 5.4 Análisis de la competencia

Para esta parte se hizo un análisis del campo de acción del proyecto en el cual se evidencia solo una competencia fuerte en cuestión de calidad y oportunidad como es Reciclamas, los demás son bodegas que proveen a las empresas procesadoras del sector.

- *Estrategias de la distribución.* Se requiere una búsqueda y apertura de mercado para el final de nuestra cadena de suministro, pero al momento se cuenta con el apoyo de Papeles el Vergel que es una empresa fuerte en la transformación y distribución del material reutilizado.
- *Estrategias de promoción.* Para la promoción de nuestros servicios se realizarán campañas de capacitación y conciencia hacia los beneficios que conlleva reciclar.
- *Estrategias de comunicación.* Se utilizarán los medios de comunicación adoptados por la fundación colaboradora tales como la página web y los números telefónicos, ya que es un proyecto adaptado para ellos.
- *Estrategias de servicio.* En servicio requerimos enfocarnos en la sustentabilidad del proyecto en la totalidad del desarrollo de la cadena de suministro teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Servicio pre- venta: Excelentes relaciones comerciales con nuestros colaboradores quienes son el pilar del proyecto ya que serán los receptores de lo que es nuestra materia prima haciendo de ellos personas con gran sentido de pertenencia hacia el medio ambiente.
- Servicio durante la venta: Efectividad a la hora de cubrir las necesidades de cada uno de los clientes, comunicación directa con cada uno de ellos.

## 6. ESTUDIO FINANCIERO

El capital inicial del negocio es de 10'000.000 que estará integrado por inversiones independientes de cada uno de nosotros y la fundación, no se utilizarán recursos de crédito, ya que la inversión inicial es baja (Tabla 5). Este dinero se empleará en lo siguiente:

- Carretas de recolección 1'500.000
- Pesa electrónica piso 2 TO 2'000.000
- 3 computadores de escritorio 2'400.000
- Impresora 200.000
- Muebles de oficina 1'200.000
- Material de oficina 400.000
- TOTAL 7'700.000

El dinero restante será la reserva para el arranque del negocio, arriendo del primer mes y eventos fortuitos.

**Tabla 5. Balance General**

ACTIVO CORRIENTE		PASIVO CORRIENTE	
Caja y bancos	\$ 2.300.000	cuentas por pagar	\$ -
Cuentas por cobrar	\$ -	cuentas por pagar diversas	\$ -
Cuentas por cobrar diversas	\$ -	total pasivo corriente	\$ -
Existencias	\$ -	PASIVO NO CORRIENTE	\$ -
Total activo corriente	\$ 2.300.000	cuentas por pagar diversas	\$ -
		total pasivo no corriente	\$ -
ACTIVO NO CORRIENTE		TOTAL PASIVO	\$ -
Valores	\$ -	PATRIMONIO	
Inmuebles, maquinaria y equipo	\$ 7.700.000	fondo partidario	\$ 10.000.000,00
Intangibles	\$ -	fondo adicional	\$ -
Total activo no corriente	\$ 7.700.000	total patrimonio	\$ 10.000.000,00
TOTAL ACTIVO	\$ 10.000.000	TOTAL PASIVO Y PATRIMONIO	\$ 10.000.000,00

### 6.1 Precios de los productos

En el estudio financiero se encontró que los precios de los materiales reciclables son bajos comparándolos con otro tipo de bien o servicio que se encuentre en el mercado, lo que indica que debe haber un trabajo fuerte en el área de ventas para poder cumplir con las metas de ventas esperadas, en las Tabla 6 y 7 se encuentran discriminados por kilogramos y toneladas los precios de venta.

**Tabla 6. Precios por kilogramo**

Papel blanco reciclado	\$ 600,00
Papel reciclado	\$ 300,00
Plástico de alta densidad	\$ 500,00
Plástico de baja densidad	\$ 250,00
Vidrio reciclado	\$ 400,00
Aluminio reciclado	\$ 2.300,00
Latas recicladas	\$ 150,00
Promedio de precios	\$ 642,86

**Tabla 7. Precios por tonelada**

Papel blanco reciclado	\$ 600.000
Papel reciclado	\$ 300.000
Plástico de alta densidad	\$ 500.000
Plástico de baja densidad	\$ 250.000
Vidrio reciclado	\$ 400.000
Aluminio reciclado	\$ 2.300.000
Latas recicladas	\$ 150.000
Promedio de precios	\$ 642.857

### 6.2 Gastos

Los egresos (Tabla 8) de la compañía están compuestos por los gastos de personal, servicios y arriendos, gastos de transporte, compras de material de empaque y gastos promocionales (campañas de sensibilización).

**Tabla 820.** Gastos fijos

Recolectoras	\$ 8.000.000,00
Arriendo	\$ 600.000,00
Servicios	\$ 400.000,00
Total	\$ 9.000.000,00

Se contemplan como gastos fijos el arriendo, servicios y la nómina de las madres recolectoras ya que con las ventas esperadas que son de aproximadamente 2.5 toneladas al mes de cada uno de los residuos sólidos recuperados solo se alcanza para cubrir estos gastos, los demás serán donados por cada uno de los colaboradores. El margen contemplado de venta al mes se encuentra discriminado en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Ventas esperadas

Papel blanco reciclado	\$ 1.500.000
Papel reciclado	\$ 750.000
Plástico de alta densidad	\$ 1.250.000
Plástico de baja densidad	\$ 625.000
Vidrio reciclado	\$ 1.000.000
Aluminio reciclado	\$ 5.750.000
Latas recicladas	\$ 375.000
Ventas esperadas	\$ 11.250.000

### 6.3 Capital de trabajo

Debido a la naturaleza del negocio, no es necesario comprar materia prima; en el mercado del reciclaje los pagos se hacen de contado, por lo que para el fin del 1er mes se proyecta haber recibido los recursos para pago de nómina, servicios, servicio de transporte etc.

## 7. METAS SOCIALES DEL PLAN DE NEGOCIO

La principal meta social que tiene el proyecto es maximizar los beneficios en la sociedad que se pueden llegar a tener con un adecuado manejo de residuos sólidos. Se inició con la idea de involucrar a la comunidad en estos procesos, pero principalmente se busca integrar a las madres cabeza de familia brindándoles una herramienta sostenible de empleo que les permita llevar un sustento económico a su hogar, obtendremos la materia prima en conjuntos residenciales y centros comerciales para adquirirla a cero costo lo que permitirá hacer una estructura financiera sólida en la cual se integra a la población recicladora en condiciones de pobreza y vulnerabilidad.

## 8. RESULTADOS

Como se mencionó inicialmente se realizó una encuesta que buscaba encontrar el grado de aceptación del proyecto en la población de madres cabeza de familia, se encontró que en edades entre 20 y 50 años es del 96%, pero se observó que la mayor motivación se logró en un rango de edades de 30 a 39 con un 97%, mientras que las menos entusiastas se ubicaron en el rango de 20 a 29 años, pero en términos generales es alto el interés por la creación de este tipo de proyectos en el sector. Los datos se muestran a continuación en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Aceptación del proyecto

Rango de edades	Porcentaje
menos de 20 años	87%
De 20 a 29 años	92%
De 30 a 39 años	97%
De 40 a 49 años	93%
Más de 50 años	90%
Promedio	92%

Según la tabla anterior se puede observar que la mayoría de las encuestadas se muestran dispuestas a colaborar con el proyecto, esto lleva a la conclusión de que, si las mujeres respondieron sinceramente, el programa de logística verde sería un éxito.

## 9. CONCLUSIONES

- De acuerdo a la encuesta realizada se evidencio que la implementación del sistema de logística verde tiene un grado de aceptación del 92% en promedio lo que indica que el proyecto tiene un alto nivel de viabilidad de implementación con la comunidad
- Según el análisis del externo se concluye que el sector de Patio Bonito, por ser una de las zonas de mayor incidencia en el deterioro ambiental de la ciudad, es la localización ideal para pruebas piloto e implementación del proyecto
- En consecuencia, con el análisis del financiero se encontró que la inversión inicial del proyecto es de 10 millones lo que indica que es mínima con respecto al beneficio ambiental y social que el proyecto genera
- En cuanto al estudio técnico la adecuación del proyecto es bastante simple ya que para el arranque del mismo solo se necesita una bodega de almacenamiento y separación de los residuos para su posterior distribución

- El estudio administrativo arroja una estructura organizacional simple que permite un óptimo desarrollo e implementación del sistema de logística sin la necesidad de implementar gran cantidad de roles.
- Según las estadísticas de generación de residuos en Bogotá se encontró que el Botadero de Doña Juana único disponible en la ciudad ya no cuenta con la capacidad suficiente para albergar los miles de toneladas que se generan, motivo por el cual es necesario intervenir con propuestas simples que se adecuen a la dinámica de la población y que mitiguen el impacto ambiental.
- Se concluyó que este trabajo será la base para la realización del caso de estudio como opción de grado para obtener el título de ingeniero industrial.

## REFERENCIAS

- [1] Adminbogota (2012). [La Alquería, único centro de reciclaje en Bogotá](#). Online [Sep 2017].
- [2] Soacha, J. & Chavarro, F. (2009). Plan de negocios para una empresa de reciclaje. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana.
- [3] UAESP (2014). [Caracterización de la población recicladora de oficio en Bogota](#). Online [Oct 2017].
- [4] <https://www.anrcolombia.org/anrenaccion>
- [5] Velandia, D. & Martínez, N. (2015). [Formulación de una estructura de costos para el sector del reciclaje formal de la materia prima PET en el barrio Industrial de la ciudad de Villavicencio](#). Online [Nov 2017].
- [6] DANE (2011). [Informe de encuesta de calidad de vida 2011](#). Online [Nov 2017].
- [7] CONPES (2016). [Política Nacional para la gestión de residuos sólidos](#). Online [Dec 2017].

# Análisis de las propiedades del PET usando mezclas de almidón de yuca y quitina extraída de las escamas de tilapia negra del Huila

María F. Manchola<sup>1</sup>

Francisco Bernal<sup>2</sup>

Hans Castro<sup>3</sup>

Corporación Universitaria del Huila  
Neiva – Colombia

El PET (tereftalato de polietileno) se ha transformado en un material indispensable para la sociedad moderna en diferentes aplicaciones, sus propiedades son viables para la construcción de envases y botellas, por su consumo masivo, genera efectos ambientales no deseables de tal manera que el presente proyecto tiene como objetivo sustituir las propiedades del PET convencional incorporando mayor biodegradabilidad para reducir la contaminación ambiental y los riesgos sobre la salud humana. De igual forma, existe la necesidad de aprovechar los subproductos derivados de la industria piscícola para crear productos de valor añadido a la región. Las soluciones que existen hoy en día, para el tratamiento de estos subproductos piscícolas son irrisorias e insuficientes para una solución definitiva a este problema, ya que se generan grandes cantidades de escamas en el Huila, que es uno de los principales departamentos que produce mayoritariamente tilapia a nivel nacional. En este proyecto se plantea usar diferentes mezclas de almidón de yuca y quitina extraída de las escamas de tilapia negra para modificar las propiedades del PET. La metodología consiste en extraer los polisacáridos, por una parte, el almidón de yuca se obtiene con base en el procedimiento establecido en la Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca publicado por la FAO, y por último la quitina se sustrae siguiendo la metodología de un estudio realizado por Acuapez y el grupo de investigación GAIA de la Corporación Universitaria del Huila, CORHUILA para la extracción de quitina a partir de las escamas de tilapia negra. El material polimérico fue preparado usando una extrusora con tornillo simple, que permite controlar la temperatura en 4 zonas de extrusión de la mezcla. Todos los materiales fueron caracterizados con base en su tracción, compresión, espectroscopia de infrarrojo (IR) y microscopia electrónica de barrido (SEM).

## 1. INTRODUCCIÓN

El consumo masivo del plástico es resultante de sus excelentes propiedades para diferentes aplicaciones en la sociedad, lo que ha contribuido a la comercialización de todo tipo de productos, aumentando el desarrollo económico y calidad de vida de la sociedad, sin embargo la generación saturada de residuos plásticos y el deficiente manejo de los mismos son los factores más incidentes en la manifestación de impactos negativos sobre la Salud y el Medio Ambiente debido al aumento de contaminación en el suelo, agua y aire y demás ecosistemas a nivel global. En Colombia, se han desarrollado diferentes técnicas para reducir los impactos negativos de los residuos plásticos, el reciclaje como principal manera de solución, durante el 2015 se recuperaron entre 3.000 y 3.500 toneladas de envases PET, lo que representa tan solo el 26% del total de plásticos generados en Colombia [1], lo cual no es suficiente para solventar esta problemática ambiental. Hoy en día, el uso de los polímeros biodegradables es una estrategia favorable para minimizar el impacto ambiental, ya tienen componentes biológicos que se degradan en periodos cortos de tiempo [2], a diferencia de los polímeros sintéticos que pueden tardar varios años para su degradación.

En la naturaleza se encuentran gran cantidad de biopolímeros que pueden ser usados de forma científica y tecnológica para el desarrollo de empaques, bolsas o botellas que la sociedad acostumbra a utilizar [3], es por eso que en esta investigación se usa almidón de yuca, que a la fecha es considerada la principal materia prima para la obtención de bioplásticos para diversas aplicaciones industriales; y de igual manera, el uso de la quitina quien es el segundo polisacárido natural más abundante después de la celulosa[4]. Una investigación realizada por [5] que obtuvieron quitina y quitosano a partir de las escamas de Tilapia negra (*Oreochromis aureus*) demostrando que es viable obtener este polímero a partir de las escamas de estos peces. Esta investigación se basa en la modificación de PET reciclado usando almidón de yuca y quitina extraída de la tilapia negra que representa una alta producción en el departamento del Huila. Pruebas físicas y químicas fueron realizadas a las muestras resultantes.

## 2. MÉTODO

### 2.1 Etapa No. 1. Recolección y adecuación del material PET reciclado

Se recolectó el material PET reciclado de diferentes locales comerciales de Neiva – Huila teniendo en cuenta que sus características fisicoquímicas fueran similares (botellas 3 litros de la misma marca comercial). Luego de esto, se hizo su correcta limpieza quitando las etiquetas para luego cortarlas en pequeños trozos (5x5 m<sup>2</sup>) cada una de ellas.

### 2.2 Etapa No. 2. Obtención de quitina

2 kg de escamas de tilapia negra fueron obtenidos a partir de la empresa Export Pez S.A.S. La obtención de la quitina a partir de las escamas de tilapia negra se hizo con base en [6]. Las escamas fueron lavadas con agua potable con el

<sup>1</sup> m.mancholap@hotmail.com

<sup>2</sup> frankbernalp@gmail.com

<sup>3</sup> hans.castro@corhuila.edu.co

fin de extraer el material orgánico sobrante como agallas, cola, vísceras, piel y espinas. Luego se filtró el agua durante 12 horas. Una vez las escamas completamente libres de impurezas fueron secadas al sol durante cinco días, con una temperatura aproximada de 35 °C. Luego con un molino eléctrico industrial de un caballo de fuerza se realizó el proceso de molienda durante 8 días hasta obtener escamas con diámetro ( $\phi \leq 500 \mu\text{m}$ ). Una solución de NaOH (0,3 N) se mezcló con las escamas y se calentaron a una temperatura entre 70 – 80 °C durante 3 horas con agitación constante. Luego, a la solución resultante se le adicionó agua hasta que su pH fuera 7, obteniendo un elemento con textura en polvo y color blanco, correspondiente a la quitina ( $\phi \leq 300 \mu\text{m}$ ).

### 2.3 Etapa No. 3. Obtención del almidón de yuca

Para la manufactura de almidón de yuca se aplicó el procedimiento establecido en el documento guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca elaborado por la [7]. Se lava la yuca, eliminando la suciedad e impurezas y se retira la cáscara dejando sólo la pulpa de la yuca, se raya y se cuele con un filtro de tela fina. El agua obtenida del lavado se deja sedimentar para que sea más fácil separar los gránulos de almidón de su suspensión en agua, se deja en un horno a 35 °C hasta que el agua se haya evaporado y quede una fina capa espesa de almidón de yuca.

### 2.4 Etapa No. 4. Preparación de las muestras poliméricas

#### 1. Materiales

- Pellet PET: Marca comercial y PET reciclado
- Quitina: extraída de las escamas de tilapia negra del departamento del Huila usándolo como polímero natural.
- Almidón de yuca
- Glicerina: (Grado comercial USP) con 96% (v/v).
- Agua destilada

2. *Proceso de preparado del material polimérico.* En la muestra 8 (13G 11A, 12G, 51P, 13A) y muestra 10 (10Q, 7A, 15G, 52P, 16A) el procedimiento de mezclado se realiza diferente a manera experimental, ya que se quiere llegar a obtener una consistencia más homogénea en el momento de incorporarla al proceso de extrusión. Se utiliza la siguiente nomenclatura para nombrarlas de acuerdo al contenido de quitina (Q), Almidón (A), Glicerina (G), PET(P) y agua (A) en este orden, por ejemplo (8Q,10A,13G,42P,27A), equivale al 8% Quitina, 10% Almidón, 13%Glicerina, 42% Poliéster y 27% Agua (Tabla 1).

**Tabla 1.** Porcentaje y gramos de quitina, almidón, glicerina, PET Y agua

Muestra	Und. Med	Q	A	G	P	A
1	(%)	8	10	13	42	27
	(g)	6,4	8	10,4	33,6	21,6
2	(%)	6	9	17	50	18
	(g)	4,8	7,2	13,6	40	14,4
3	(%)	12	7	13	51	17
	(g)	9,6	5,6	10,4	40,8	13,6
4	(%)	7	5	17	53	18
	(g)	5,6	4	13,6	42,4	14,4
5	(%)	10	8	18	47	17
	(g)	8	6,4	14,4	37,6	13,6
6	(%)	9	7	12	55	17
	(g)	7,2	5,6	9,6	44	13,6
7	(%)	7	7	15	52	19
	(g)	5,6	5,6	12	41,6	15,2
8	(%)	13	11	12	51	13
	(g)	10,4	8,8	9,6	40,8	10,4
9	(%)	9	7	12	55	17
	(g)	7,2	5,6	9,6	44	13,6
10	(%)	10	7	15	52	16
	(g)	8	5,6	12	41,6	12,8

Las temperaturas de extrusión se presentan en la Tabla 2. Es necesario dar un correcto uso para obtener un buen funcionamiento del equipo, igualmente es necesario realizar la limpieza respectiva después de cada uso, ya que el material que queda incorporado en la extrusora puede generar daños y estancamiento en un próximo uso.

**Tabla 2.** Temperaturas de extrusión

Muestra	Temperatura °C			
	Z 1	Z2	Z3	Z 4
1	130	140	150	159
2	135	145	155	160
3	125	136	147	155
4	129	136	149	150
5	100	110	120	125
6	112	121	131	141
7	81	101	115	125
8	99	110	128	130
9	99	111	124	132
10	96	108	129	133

## 2.5 Etapa No. 5. Caracterización de las muestras poliméricas

Los análisis que se realizaron en cada una de las muestras poliméricas se encuentran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Análisis de las muestras poliméricas

Análisis	Muestras		
	M 8	M 9	M 10
FTIR-ATR			X
SEM	X	X	X
Tensión	X	X	X
Compresión	X	X	

### 1. Espectroscopia de infrarrojo

- Preparación de la muestra: Debido a la forma de la muestra, fue necesario hacer dos cortes a la misma, uno longitudinal y posterior uno trasversal, para disminuir el tamaño de la muestra y obtener una superficie plana que permitiera el análisis FTIRATR. Las condiciones del equipo están en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Condiciones de adquisición de los espectros FT-IR-ATR

Equipo	is50 FT-IR Nicolet. Thermo Scientific
Rango de Adquisición	4000-400cm <sup>-1</sup>
Número de Scans	32
Resolución	4
Velocidad Óptica	0.4747 cm/s
Modo	Transmitancia
Apertura	100
Software	OMNIC

### 2. Microscopia electrónica de barrido

- Preparación de la muestra: Las muestras fueron adheridas a un porta muestras individual usando cinta de carbono doble faz, se recubrieron con oro mediante un sistema de recubrimiento Quorum 150ES.
- Tipo de Análisis: La adquisición de las imágenes se realizó con un Microscopio Electrónico Quanta FEG 650 ambiental (ESEM), trabajando en el modo de bajo vacío utilizando el detector de bajo vacío "Large Field Detector" (LFD) y el detector de electrones retro dispersados "Backscatter Electron Detector" (BSED).
- Análisis elemental. Los análisis puntuales, fueron realizados gracias a que este instrumento esta acoplado a un detector EDAX APOLLO X que tiene una resolución de 126.1 eV (en. Mn K $\alpha$ ) para realizar análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy), proporcionando información cualitativa y semi-cuantitativa de los elementos químicos presentes en los materiales. Los elementos químicos detectados mediante el EDS se rastrearon en los puntos de interés, revelando las posibles concentraciones elementales.
- Experimental: La muestra suministrada fue montada en el porta-muestras e insertada en el Quanta 650 FEG SEM ambiental (ESEM) (Microscopio Electrónico de Barrido). El análisis de las muestras se realizó bajo las siguientes condiciones analíticas:
  - Imágenes de Electrones Retro dispersados (BSED): voltaje de aceleración 20 KV, tamaño de spot 4.5, distancia de trabajo (WD) 10 mm.
  - Imágenes de Electrones Secundarios (SE): voltaje de aceleración 20KV, tamaño del spot 4.5, distancia de trabajo (WD) 10 mm.
  - Análisis Químico (EDS): detector SDD Apollo X, voltaje 20 KV tamaño de spot 4.5, distancia de trabajo 10 mm.

- Tensión.** Se utiliza una muestra de L0 de 100 mm tal como aparece en la Tabla 5 para determinar las propiedades mecánicas en tracción de una muestra compuesta de matriz polimérica. No es posible utilizar un método normalizado por la naturaleza y estado de la muestra.

**Tabla 5.** Condiciones del ensayo del análisis de tensión

Temperatura durante la prueba [°C]	24,5 ± 1,6
Humedad relativa[%]	63,4 ± 9,4
Velocidad de desplazamiento [mm/mm]	3,18 ± 0,10
Celda de carga [kN]	0-50
Clase de la celda de carga [%]	0,5
Tipo de sensor de deformación [%]	Cabezal superior
Método empleado	No aplica
Muestra utilizado tipo:	Polimérica no normalizada
Orientación:	En el sentido de extrusión

- Equipo de ensayo.** Los ensayos mecánicos realizados por el Centro de la industria, la Empresa y los Servicios SENA – Huila entre ellos: Tensión y Compresión; utilizan el siguiente equipo con sus respectivas características:
  - Máquina universal de ensayos Tinus Olsen modelo 50ST, con celda de carga de 50 kN serie No ST-AF-00232GB con número de identificación 952719186.



- Paquímetro electro digital de la firma Mitutoyo, modelo CD-6" ASX serie No B16223524 con número de identificación 952720881.
- *Compresión.* Se utiliza una muestra para determinar las propiedades mecánicas en aplastamiento de una muestra compuesta de matriz polimérica. No es posible utilizar un método normalizado por la naturaleza y estado de la muestra (Tabla 6).

**Tabla 6.** Condiciones de ensayo del análisis de compresión

Temperatura durante la prueba [°C]	24,5 ± 1,6
Humedad relativa[%]	63,4 ± 9,4
Velocidad de desplazamiento [mm/mm]	1,27 ± 0,10
Celda de carga [kN]	0-50
Clase de la celda de carga [%]	1,0
Tipo de sensor de deformación [%]	Cabezal superior
Método empleado	No aplica
Muestra utilizado tipo:	Polimérica no normalizada
Orientación:	Aplastamiento

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Obtención de temperatura apta de trabajo en la extrusora con polímeros

En el transcurso de la operación de la extrusora con los polímeros nombrados en la realización de las mezclas a caracterizar para el proyecto, se ha venido estudiando e investigando las diferentes temperaturas de cada una de las muestras. Según [8] el proceso de obtención de plástico biodegradable requiere de energía calórica en las operaciones de transferencia como es el mezclado donde debe alcanzarse temperatura de 60°C, el extrusor donde debe alcanzarse 150°C y el secador de lecho fluidizado donde el aire extrae calor del pellet enfriándolo hasta solidificación.

Por esta razón trabaja con temperaturas de 80°C - 150 °C determinando que al aumentar la temperatura 150°C la mezcla polimérica se quema obteniendo un color café oscuro, su textura es dura y no es muy flexible, por lo contrario, la temperatura respetada para la extrusión es de 90, 100, 120, 130°C aproximadamente en las 4 zonas de extracción respectivamente el resultando es obtener un material flexible, con mayor cristalinidad y más homogéneo.

#### 3.2 Metodología experimental y análisis para obtención de mezclas poliméricas

La metodología elaborada en el presente proyecto fue experimental por ensayo y error. Se prepararon 11 mezclas en total de acuerdo con la Tabla 7 en el que se describe las relaciones de las cantidades de mezclas poliméricas usadas en la preparación del material a temperaturas diferentes elaborada a partir de literaturas con experimentos de almidón de yuca modificado y plastificantes referenciada por [9] con algunas modificaciones en el tiempo de experimentación variando los porcentajes de almidón, glicerina, quitina, agua y poliéster.

**Tabla 7.** Relación de materiales en las muestras poliméricas

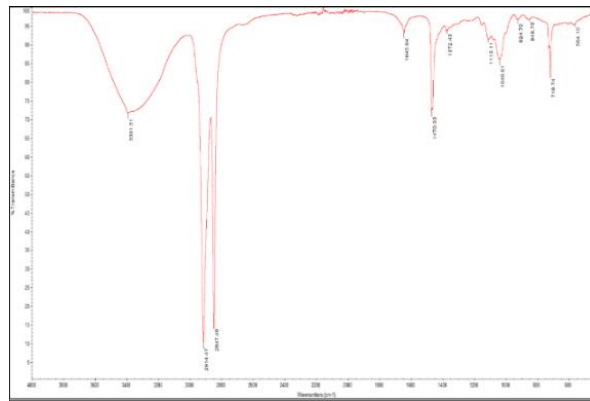
Muestra N°	Q %	A %	G %	P %	A %
1	8	10	13	42	27
2	6	9	17	50	18
3	12	7	13	51	17
4	7	5	17	53	18
5	10	8	18	47	17
6	9	7	12	55	17
7	7	7	15	52	19
8	13	11	12	51	13
9	9	7	12	55	17
10	10	7	15	52	16
11	10	12	13	51	14

Es necesario destacar que los primeros cuatro experimentos fueron realizados con escamas molidas ya que la quitina se presentó en menor cantidad y ésta la utilizamos en las últimas mezclas cuando los métodos seleccionados de cada uno de los materiales poliméricos fueron más precisos y seguros, por tal motivo en las muestras 6 - 11 son muestras realizadas con quitina.

Las mezclas que presentan el mejor comportamiento en cuanto a su extrusión, tuvieron buena fluidez, homogeneidad, y de un color más opaco, fueron las siguientes: Muestra 8 (13Q, 11A, 12G, 51P, 13A), Muestra 9 (9Q, 7A, 12G, 55P, 17A), y la Muestra 10 (10Q, 7A, 15G, 52P, 16A), por lo tanto, son estas muestras las que se envían para realizar los diferentes análisis fisicoquímicos de espectroscopia infrarrojo, microscopia electrónica de barrido, tensión y compresión.

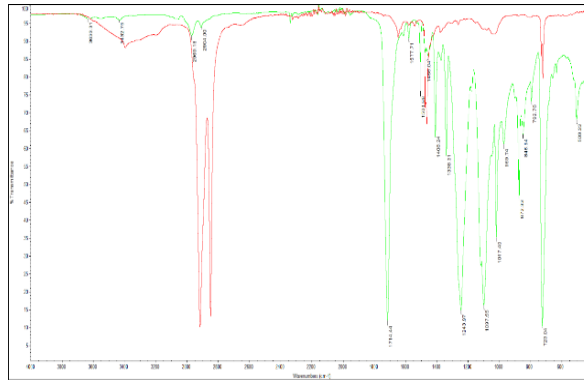
#### 3.3 Análisis de la muestra polimérica en espectroscopia de infrarrojo.

En la Figura 1, se identifican bandas de amidas primarias alifáticas, estas se encuentran ubicadas en la región de 3500-3400 cm<sup>-1</sup>, pero no se observan definidas y esto se debe al solapamiento por las bandas de vibración de alargamiento del OH entre 3700 y 3000 cm<sup>-1</sup>, que son bastante anchas.



**Figura 1.** Espectro FTIR-ATR Muestra 10

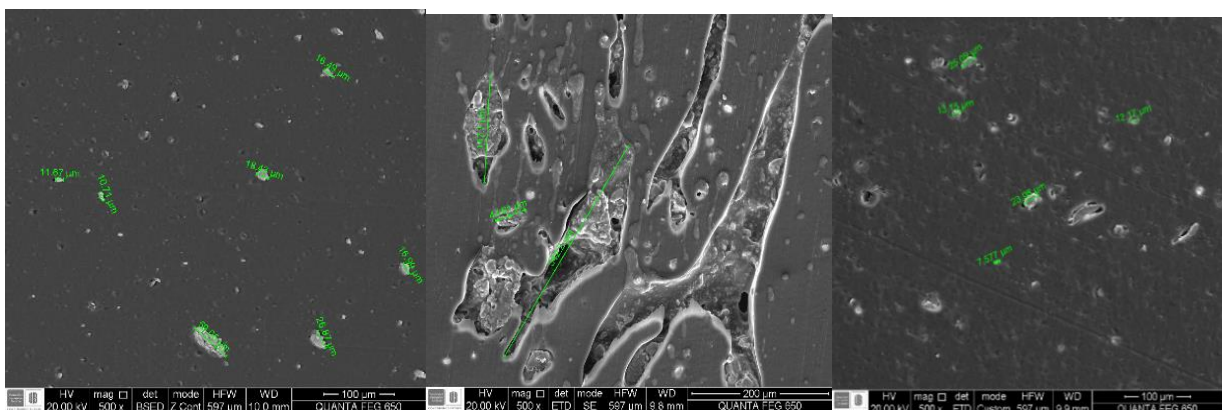
El ensayo de FTIR-ART demuestra que existe un enlace de estiramiento O-H de al almidón de yuca incorporado en la extrusión de la mezcla polimérica 10, donde se resalta el incremento gradual de la banda a  $3391\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a los grupos hidroxilos -OH de las bases de glucosamina del polímero, conforme se fue aumentado el contenido del TPS en el material, y la banda  $1470\text{ cm}^{-1}$  corresponde a la banda característica del enlace N-H del grupo funcional amida, las bandas por debajo de  $600\text{ cm}^{-1}$  corresponden a los enlaces característicos de la hidroxiapatita, tales como P-O y Ca, presente en las escamas de tilapia. Según los resultados obtenidos en el ensayo de espectroscopia de infrarrojo de la muestra 10, se compara el espectro, con los correspondientes al análisis del PET convencional, en la Figura 2 se demuestra que hay una modificación en el material polimérico muestra 10 con respecto del PET convencional analizado por ensayo de espectroscopia de infrarrojo.



**Figura 2.** Registro comparativo base de datos del equipo

### 3.4 Análisis de la morfología de las muestras poliméricas mediante microscopia electrónica de barrido

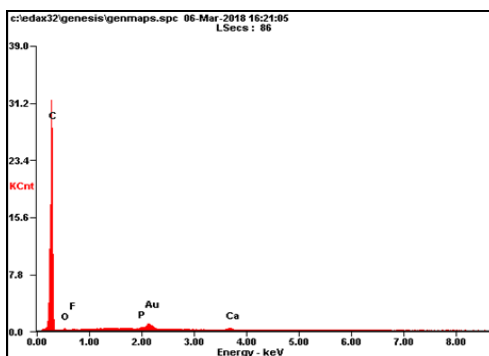
Las imágenes de las muestras de poliéster modificado con almidón de yuca y quitina extraída de la tilapia negra del Huila obtenidas por microscopía electrónica de barrido y los espectros de energía dispersiva de rayos X (energy dispersive spectroscopy) EDS son presentadas en las Figuras 3 y 4).



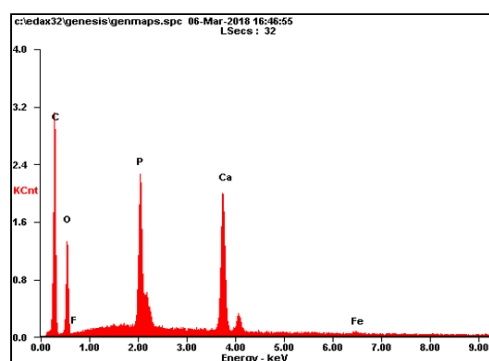
**Figura 3.** Imágenes de microscopia electrónica de barrido de las muestras con Poliéster modificado. 3A. Muestra 8 (13Q, 11A, 12G, 51P, 13A) Temp.99, 110, 128, 130. 3B. Muestra 9 (9Q, 7A, 12G, 55P, 17A) Temp.99, 111, 124, 132. 3C. Muestra 10 (10Q, 7A, 15G, 52P, 16A) Temp.96, 108, 129, 133

Se observan las imágenes tomadas de las morfologías que se realizaron a cada una de las muestras. Las zonas con tonalidades grises y blancas que se observan corresponden al almidón de yuca y a la quitina dado que su textura inicial era granular. La muestra 9 (9Q, 7A, 12G, 55P, 17A) observada en la Figura 3B presenta una contextura no uniforme diferente a las otras dos muestras con gránulos entre  $44.61$  y  $342.2\text{ }\mu\text{m}$  indicando pobre dispersión de los

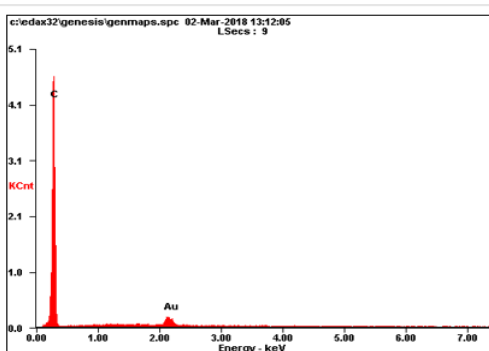
componentes, las mezclas de las muestras 10 (10Q, 7A, 15G, 52P, 16A) y 8 (13Q, 11A, 12G, 51P, 13A) presentan una distribución similar, poco uniforme de los gránulos de almidón y quitina como lo presenta en las Figuras 3A y 3C, los tamaños de los gránulos de almidón y quitina están entre 11.67 y 26.87  $\mu\text{m}$ , lo cual indica poca a dispersión de las mezclas analizadas.



Muestra 8 (13Q, 11A, 12G, 51P, 13A)



Muestra 9 (9Q, 7A, 12G, 55P, 17A)



Muestra 10 (10Q, 7A, 15G, 52P, 16A)

**Figura 4.** Energía dispersiva de rayos X (EDS)

Los espectros realizados en cada una de las muestras son espectros de energía dispersiva de rayos X (*Energy Dispersive Spectroscopy*) EDS, son debidos a la emisión de rayos X generados por la muestra en su interacción con los electrones. El espectro obtenido (Figura 4) muestra la composición elemental de cada material que contiene las muestras estudiadas por lo que permite identificar los elementos asociados a C, O, F, P, Ca y Fe siendo los principales elementos encontrados en el estudio de EDS de las muestras 8 – 10 de poliéster modificado. Hay que tener en cuenta que el elemento Au que se presenta en las muestras 8 y 10 es el recubrimiento de oro que es necesario proporcionar a la muestra a analizar para el sistema de recubrimiento Quorum 150ES.

Según la muestra 8 (13Q, 11A, 12G, 51P, 13A) presentan elementos de C, O, F, P, Ca, y Fe con alto porcentaje de Carbono encontrado, la muestra 9 (9Q, 7A, 12G, 55P, 17A) presenta altos porcentajes de C, O y Ca) y en la muestra 10 (10Q, 7A, 15G, 52P, 16A) presenta un alto porcentaje único de C. Hay que tener en cuenta que en las muestras 9 y 10 los estudios de espectro para caracterizar los elementos compuestos se tomaron en puntos específicos, por lo contrario, en la muestra 8 dado que su morfología es más homogénea se tomó una zona de referencia más amplia para caracterizar los elementos que se presentaban en esta zona.

### 3.5 Análisis de la morfología del Poliéster modificado mediante análisis de tensión

En las ecuaciones (1) a (6) se encuentran las ecuaciones respectivas para cada uno de los procedimientos en el cual se hallaron los valores técnicos de las muestras analizadas para los estudios de tensión y compresión, Tablas 13 y 14 respectivamente.

$$\text{Resistencia de tensión} = F/A \quad (1)$$

$$\% \text{elongación} = \Delta L/L_0 \times 100 = (L_f - L_0) / L_0 \times 100 \quad \Delta L = (\% \text{elongación}) / 100 \times L_0 \quad (2)$$

$$\text{Módulo de elasticidad: } E = \text{Tensión} / \text{Deformación unitaria} \quad (3)$$

$$\text{Tenacidad: } \text{Tensión} \times \text{Deformación unitaria} \quad (4)$$

$$\% \text{Reducción del área} = (L_0 - L_f) / L_0 \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Resistencia de compresión} = F/A \quad (6)$$

Los datos técnicos respecto al ensayo de tensión de las muestras de poliéster modificado 8 (13Q, 11A, 12G, 51P, 13A), 9 (9Q, 7A, 12G, 55P, 17A) y 10 (10Q, 7A, 15G, 52P, 16A) se encuentran en la Tabla 8 presentando cada uno de las características estudiadas mediante el análisis de tensión y su valor correspondiente.

**Tabla 8.** Valores técnicos obtenidos de los análisis de tensión

Características	Valor obtenido		
	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10
Fuerza máxima [N]	325	224	234
Esfuerzo máximo [MPa]	9,1	9,17	7,73
Esfuerzo de fractura [MPa]	Sin fractura	Sin fractura	7,71
Esfuerzo de fluencia [MPa]	N.A	N.A	N.A
Elongación al esfuerzo máximo [%]	35,7	53,8	55,5
Elongación a la fractura [%]	Sin fractura	Sin fractura	55,5
Diámetro de la probeta [mm]	6,74	5,57	6,21
Sección [mm <sup>2</sup> ]	35,6	24,4	30,3

### 3.6 Análisis de la morfología del Poliéster modificado mediante análisis de compresión

En la Tabla 9 se observan los estudios realizados de ensayo de compresión muestra 8 y 9 con los valores

**Tabla 9.** Características y valores técnicos obtenidos y características

Características	Valor obtenido	
	Muestra 8	Muestra 9
Fuerza máxima [N]	30600	36200
Elongación al esfuerzo máximo [%]	N.A	N.A
Altura inicial [mm]	4,04	7,91
Altura final [mm]	1	2,88

## 4. DISCUSIÓN

Las propiedades encontradas de los polímeros obtenidos coinciden con aplicaciones potenciales en la industria electrónica, tales como: paneles aislantes, cuerpos de bobinas, fundas, cubiertas, en la industria mecánica como engranajes y en la industria automotriz como maletas, brazos del limpiaparabrisas y manijas de las puertas e innovación de componentes en piezas de ingeniería como cercos de madera plásticas [10].

Los análisis realizados en cada una de las muestras por FTIR-ATR y SEM demuestran que los elementos encontrados dentro de las mezclas poliméricas corresponden a los grupos hidroxilos -OH de las bases de glucosamina del polímero; esto es característico del almidón y la quitina [11] siendo materia fundamental para el proyecto de PET modificado, son polisacáridos constituidos principalmente por cadenas glucosídicas [12]. De igual manera los elementos P, H, Ca mayormente encontrados en los análisis de EDS demuestran que son característicos de la hidroxiapatita, presente en las escamas de tilapia. Según [13] las mezclas de TPS + quitosano han mostrado disminución en los diferentes procesos de retrogradación ocurridos durante el almacenamiento, dada la reorientación de las moléculas de amilosa y amilopectina dentro de la matriz termoplástica [14], otro material ideal es el TPS + hidroxiapatita, biomaterial usado en implantes compatibles con el sistema óseo en humanos [15]. Las pruebas de resistencia a la tensión y compresión, y el valor del módulo de elasticidad muestran sus resultados en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Propiedades mecánicas del TECADUR PET natural y TECADUR PBT GF30 [16]

N. Muestra	Resistencia a la Tensión (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Resistencia a la (MPa)
8	9,1	101,4	3,70 / 7,39
	9,17	76,6	4,71 / 9,41
10	7,73	64,06	-

Característica	PET	PBT
Resistencia a la tensión	91 MPa	46 MPa
Módulo de elasticidad	3300 MPa	3400 MPa
Resistencia a la compresión (1 y 2% de Deformación)	21 / 38 MPa	20 / 38 MPa

Los datos mostrados en las Tablas 10 y 11 indican que la muestra 9 es el valor más alto del esfuerzo de tensión y pertenece a la relación almidón-quitina (7 y 9%, respectivamente), resultado que también está relacionado con la mayor fuerza de compresión. Es el mejor comportamiento mecánico entre las muestras analizadas debido al mayor contenido de glicerina, lo cual reduce las fuerzas intermoleculares como los puentes de hidrógeno [17], comparado con el artículo científico sobre polímero biodegradables a partir del almidón de yuca [9].

A pesar de la baja resistencia mecánica a comparación de la del PET natural pertenecen al grupo de los termoplásticos semicristalinos [18] porque se funden y se pueden moldear cuando alcanza unas temperaturas altas y al enfriarse recuperan su consistencia original [8], además de poseer mejor resistencia mecánicas y rigidez que los materiales amorfos y asimilarse un poco más a las propiedades mecánicas del PBT [11]. Los datos de resistencia a la tensión y tenacidad de cada muestra determinan la primera a la magnitud de fuerza para romper una muestra y la última a la cantidad de energía para romper una muestra, de esta manera las características se definen en la siguiente Tabla 11.

**Tabla 11.** Características mecánicas de las mezclas poliméricas

<b>N. de muestra</b>	<b>Descripción</b>
8	Plástico resistente y no tenaz
9	Plástico resistente y tenaz
10	Plástico resistente y tenaz

## 5. CONCLUSIONES

- La extrusión de materias primas renovables de la región como el almidón de yuca y quitina extraída de las escamas de tilapia negra con materiales sintéticos como el PET permite la fabricación de un polímero sintético modificado y teóricamente bioplástico que presenta unas propiedades aceptables para la aplicación susceptible a una mejora para aplicar en envases.
- El mejor comportamiento mecánico de resistencia a la tensión y compresión es la mezcla 8 (13Q, 11A, 12G, 51P, 13A)), ya que presenta mayor resistencia de tensión y compresión sin fractura.
- De la elaboración del plástico biodegradable se determinó que la temperatura de la extrusión y cantidades de almidón, quitina y glicerina son factores muy importantes, ya que afectan la elasticidad, color y consistencia del material. Si la extrusión se encuentra a altas temperaturas se produce un material quebradizo, frágil; por otro lado, si esta operación se realiza de forma gradual se obtiene una forma homogénea. En cuanto a la relación almidón, quitina/glicerina, al aumentar las proporciones de esta última en la formulación se obtenía un producto más elástico.
- En la mayoría de las mezclas no se observa una distribución homogénea de los gránulos de almidón y quitina, con un tamaño entre 11.67 y 26.87  $\mu\text{m}$ , lo cual indica una dispersión pobre de éstos.
- Los perfiles de temperatura en la extrusora para obtener mezclas homogéneas y completar la desestructuración del polímero biodegradable, están entre 99, 110, 128, 130  $^{\circ}\text{C}$  y 96, 108, 129 y 133  $^{\circ}\text{C}$ .

## REFERENCIAS

- [1] Suárez, D. (2016). [Apenas el 26% de las botellas plásticas se recicla](#). La República. Online [Mar 2018].
- [2] LSAP (sf). [Espectrometría Infrarrojo](#). Centro de Astrobiología. Online [Sep 2017].
- [3] Navia, D., Ayala, A. & Villada, H. (2013). Evaluación mecánica de bioplásticos semirrígidos elaborados con harina de yuca. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial* 2, 77-84.
- [4] Reddy, M. et al. (2013). Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities. *Progress in Polymer Science* 38, 1653-1689.
- [5] García, A., Romero, R. & Castro, H. (2016). Aprovechamiento de las escamas de la industria acuícola en el departamento del Huila, Colombia. *Producción + Limpia* 11(2), 102-110.
- [6] Carrera, S. et al. (2016). Aprovechamiento de residuos generados por la actividad piscícola. Ed. USCO.
- [7] FAO (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. *Boletín de servicios agrícolas* 163.
- [8] Angeles, P. (2015). Diseño de un proceso industrial para obtener plástico biodegradable (TPS) a partir de almidón de yuca *manihot sculenta*. Tesis doctoral. Lambayaque, Perú.
- [9] Ruiz, G. (2005). Polímeros biodegradables a partir del almidón de yuca. Proyecto de Investigación para Maestría. Universidad EAFIT.
- [10] RDV (sf). [Los plásticos y la industria automotriz](#). Representaciones Industriales. Online [Feb 2017].
- [11] Benavente, R. (1997). Polímeros amorfos, semicristalinos, polímeros cristales líquidos y orientación. *Elementos estructurales con materiales polímeros* 53, 49-63.
- [12] Si, X. et al. (2016). Effect of sulfation on the antioxidant properties and in vitro cell proliferation characteristics of polysaccharides isolated from corn bran. *Journal of food* 14(4), 555-564.
- [13] Villada, H. & Acosta, H. (2008). Investigación de almidones termoplásticos, precursores de productos biodegradables. *Información Tecnológica* 19(2), 3-14.
- [14] Escuela Colombiana de Ingeniería (2011). [Ensayo de Tensión](#). Protocolo. Online [Sep 2017].
- [15] García, A. (2015). Obtención de un polímero biodegradable partir de almidón de maíz. ITCA Editores.
- [16] Ensinger (sf). [Tecadur pet natural-stock shapes](#). Online [Feb 2018].
- [17] Rodríguez, L. & Orrego, C. (2016). Aplicaciones de mezclas de biopolímeros y polímeros sintéticos: revisión bibliográfica. *Revista científica* 25, 252-264.
- [18] Alfaro, J. (2009). Materiales biodegradables para envases alimentarios. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

# Análisis de la viabilidad técnica para la recuperación de estruvita e hidroxapatita a partir del agua residual generada en campus universitarios: Caso de estudio Universidad Autónoma de Occidente

Nancy Vásquez S.<sup>1</sup>

Diego A. Larrahondo C.<sup>2</sup>

Hernán D. Mazuera R.<sup>3</sup>

Universidad Autónoma de Occidente  
Cali – Colombia

En este capítulo se presentan los resultados preliminares del análisis de las condiciones técnicas para la recuperación de nitrógeno y fósforo como estruvita e hidroxapatita, respectivamente, tomando como caso piloto el sistema de tratamiento de agua residual de la Universidad Autónoma de Occidente. El proyecto se desarrolla en dos etapas; en la Etapa 1, se realiza el análisis del potencial para la formación de estruvita e hidroxapatita, y en la Etapa 2, la definición de condiciones operacionales para la implementación de un sistema de recuperación de nutrientes en la Universidad Autónoma de Occidente. Los resultados preliminares han demostrado que para promover el manejo integrado del agua residual es necesario identificar la etapa del sistema en la cual se puede aplicar la recuperación de nitrógeno y fósforo, ya que para la recuperación de nitrógeno de manera preliminar se evidenció que la etapa más adecuada para recuperar la estruvita es en la etapa inicial del proceso, mientras que, para la recuperación de hidroxapatita o fosfatos de calcio, la etapa apropiada podría ser al final del proceso. Las principales variables operativas para promover la recuperación de nutrientes, que deben ser ajustadas son las fracciones molares de  $Mg^{+2}$ :  $PO_4^{-3}$ ,  $NH_4^+$ :  $PO_4^{-3}$  y  $Ca^{+2}$ :  $PO_4^{-3}$  en el agua residual y el pH de solubilización y el tiempo de mezcla del proceso. El desarrollo de este proyecto de investigación ha permitido identificar algunos elementos importantes para establecer las condiciones tecnológicas y operativas para la recuperación de nutrientes, lo que es necesario para un enfoque integral en los sistemas de tratamiento de agua residual.

## 1. INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es considerado como uno de los recursos con mayor importancia para el desarrollo de la sociedad; por lo tanto, parte de las metas de desarrollo establecidas por la Organización de las Naciones Unidas es, lograr su adecuada gestión, de tal manera que permita impulsar el crecimiento económico de los países y garantizar una mejor calidad de vida para las personas [1]. La generación de agua residual es una consecuencia inevitable de las sociedades contemporáneas, debido a que todas las actividades antrópicas las generan, ya sea de manera directa o indirecta. El agua residual se genera en diferentes sectores y a diferentes escalas, y por lo general puede generar un riesgo sobre los diferentes ecosistemas, lo que hace necesario su tratamiento antes de su vertimiento en fuentes hídricas o superficies de suelo [2].

Los diferentes esquemas tecnológicos para el tratamiento del agua residual tienen como objetivo principal la disminución de la materia orgánica, de los nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno y de contaminantes específicos como metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, entre otros. Para el caso de los nutrientes, existe una especial atención, ya que son directamente responsables de la eutrofización o crecimiento excesivo de especies vegetales en los cuerpos de agua de ríos, lagos y mares en todo el mundo. En consecuencia, los vertimientos de agua residual producen una amenaza constante a la disminución de agua dulce a escala global [3]. Por otro lado, el nitrógeno y el fósforo son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, animales y para el suministro de alimentos, lo que hace necesario su incorporación a las cadenas productivas, incrementando su demanda en el ambiente [4].

Considerando esta problemática es preciso el desarrollo e implementación de alternativas de tratamiento, que no sólo sean útiles en términos de tratamiento del agua residual, sino también que integren aspectos de sostenibilidad, viabilidad económica e integración con el entorno, y que adicionalmente permitan aprovechar el contenido de fósforo y nitrógeno que presenta el agua residual, de tal manera que se pueda generar un efluente con características que ayudan reducir el impacto ambiental y se genere un producto con potencial uso como nutriente.

Entre las alternativas utilizadas tanto para el tratamiento del agua residual, como para la recuperación de nutrientes, se encuentra la precipitación química de la estruvita o hidroxapatita, los cuales son cristales que pueden ser utilizados como nutrientes en la agricultura y en otras actividades industriales. Entre las principales limitaciones asociadas a la precipitación química de la estruvita e hidroxapatita se encuentran las características del agua residual y las condiciones específicas para que se lleve a cabo la formación de los cristales, por lo tanto, se hace necesario desarrollar estudios específicos que permitan obtener elementos para la incorporación de este proceso como una alternativa complementaria para el tratamiento del agua residual y la recuperación de nutrientes.

---

<sup>1</sup> nvasquez@uao.edu.co

<sup>2</sup> diego.larrahondo@uao.edu.co

<sup>3</sup> hernan.mazuera@uao.edu.co

Los resultados de este trabajo de investigación se enmarcan dentro del proyecto de Investigación “Evaluación de la recuperación de nitrógeno y fósforo para la gestión integral del agua residual en Campus Universitarios: Caso de Estudio Universidad Autónoma de Occidente” -17INTER-290 y de las actividades del Semillero de Investigación “Desarrollo y Evaluación de Tecnologías para la Gestión Integral del Agua Residual, DEAR”, ejecutados por el grupo de Investigación “Modelado, Análisis y Simulación de Procesos Ambientales e Industriales, PAI+”.

## 2. MARCO TEÓRICO

La precipitación química de nutrientes involucra operaciones físicas y procesos químicos, mediante la utilización de unidades de sedimentación y sales metálicas que reaccionan con el nitrógeno y el fósforo presentes en el agua residual promoviendo la formación de diferentes cristales [5, 6]. Por lo tanto, es necesario conocer la formación, sus fuentes primarias y potencial de uso para la estruvita y la hidroxiapatita.

### 2.1 Estruvita

La estruvita es el nombre por el que se conoce normalmente al fosfato de magnesio y amonio hexahidratado. En ocasiones recibe el nombre de MAP (“magnesium ammonium phosphate”). La morfología de los cristales de estruvita es ortorrómbica (Figura 1); sin embargo, también se puede encontrar en forma esférica o dendrítica. La estruvita es térmicamente inestable a temperaturas por encima de 50°C y puede perder todas o parte de las moléculas de amonio y agua dependiendo de la temperatura alcanzada y del tiempo de exposición a esas temperaturas [7], en dichos casos se obtiene la estruvita monohidratada [8].

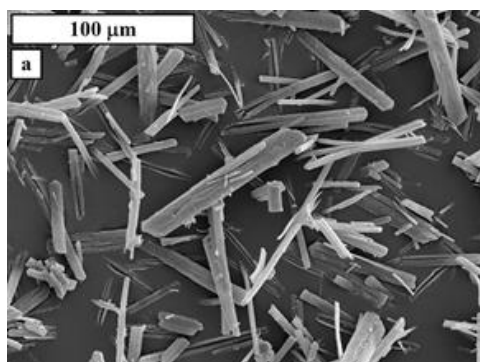
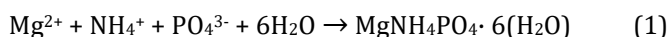


Figura 1. Cristales de estruvita típicos [9]

La estruvita es una sustancia cristalina blanca que consiste en magnesio, amonio y fósforo en iguales concentraciones molares ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ). La estruvita se forma de acuerdo con la reacción general que se muestra en la ecuación (1); sin embargo, es importante considerar que esta ecuación es una simplificación de los procesos químicos involucrados en la precipitación de la estruvita [10].



La precipitación de estruvita puede separarse en dos etapas: nucleación y crecimiento. La nucleación ocurre cuando los iones constituyentes se combinan para formar embriones de cristal. El crecimiento del cristal continúa hasta que se alcanza el equilibrio [11]; sin embargo, en sistemas con constituyentes de estruvita; p.ej. plantas de tratamiento de agua residual, el crecimiento del cristal puede continuar indefinidamente, siendo este un aspecto importante a considerar en la gestión integral del agua residual. El proceso de precipitación de la estruvita está controlado por los parámetros como el pH, grado de sobresaturación, temperatura y la presencia de otros iones en solución como el calcio [12]. Esto puede ocurrir cuando las concentraciones de iones de magnesio, amonio y fosfato exceden el producto de solubilidad (a menudo denominado  $K_{sp}$ ) para estruvita; como se puede observar en la ecuación (2).

$$K_{sp} = [Mg^{+2}] \cdot [NH_4^+] \cdot [PO_4^{-3}] \quad (2)$$

La principal dificultad para predecir la formación de estruvita en medios como el agua residual es que muchas especies iónicas (p. Ej.,  $Ca^{+2}$ ,  $K^+$ ,  $CO_3^{-2}$ ) pueden influir en la saturación de la estruvita al reaccionar con sus componentes,  $Mg^{2+}$ ,  $PO_4^{3-}$  y  $NH_4^+$ , por lo tanto, es necesario conocer la disponibilidad de iones libres o actividad iónica para un pH dado. Teniendo en cuenta estas reacciones, para el proceso de formación de la estruvita se debe incorporar el producto de la solubilidad condicional (Ecuaciones (3) y (4)), que permite incorporar la interferencia de las otras especies iónicas durante el proceso.

$$C_{sp} = C_{T,Mg^{+2}} \times C_{T,NH_4^+} \times C_{T,PO_4^{-3}} \quad (3)$$

$$C_{T,Mg^{+2}} = \frac{[Mg^{+2}]}{\alpha_{Mg^{+2}}} \quad (4)$$

Donde  $C_{T,Mg^{+2}}$  es la concentración analítica total de magnesio y  $\alpha$  es la fracción de ionización que puede continuar formando estruvita [13]. Esta noción de producto de solubilidad condicional es útil ya que permite una evaluación



rápida del estado de cristalización de una solución y establecer la viabilidad de formación de la estruvita, sobre todo si el agua residual presenta características que cambian continuamente. En el análisis del proceso se tiene que:

- Si  $C_{sp} \leq CT, Mg \times CT, PO_4 \times CT, NH_4$ , la solución está sobresaturada, y la estruvita debe precipitar hasta el equilibrio.
- Si  $C_{sp} \geq CT, Mg \times CT, PO_4 \times CT, NH_4$ , la solución está subsaturada con respecto a la estruvita, no se producirá precipitación.

## 2.2 Hidroxiapatita

La hidroxiapatita es un mineral del grupo de la apatita, la es un grupo de minerales de fosfato que se caracterizan por la presencia de calcio y fosfato en su estructura. La relación molar Ca/P determina el tipo de fosfato de calcio y por lo tanto sus características de solubilidad; entre menor sea esta relación, mayor será la solubilidad del fosfato, determinando la aplicabilidad y uso de los mismos; entre los fosfatos de calcio, la hidroxiapatita es la forma más estable menos soluble [14]. Para la formación de hidroxiapatita es necesario un proceso previo de precipitación química y posteriormente de cristalización, teniendo al igual que en la formación de la la estruvita un proceso de nucleación y crecimiento. La suspensión de nanocrystal de hidroxiapatita se puede preparar mediante la reacción de precipitación química húmeda mediante la ecuación (5) [16].



Teniendo en cuenta la forma como se promueven los procesos, la nucleación puede ser primaria o secundaria la nucleación primera hace referencia a la formación de cuerpos diminutos en el interior de una fase homogénea sobresaturada, y la segunda hace referencia al proceso de formación de nuevos cristales a partir de una solución sobresaturada con cristales que ya estaban por nucleación primaria. El crecimiento es cuando se forman núcleos estables y empiezan a crecer hasta que se llegan a ser cristales de mayor tamaño [5]. En la Figura 2 se presentan las etapas del proceso de cristalización y en la Figura 3 se puede observar la micrografía de la formación de hidroxiapatita que se somete a dos condiciones de pH diferentes (a: pH 9.0 y b: pH 11.5 [15]).

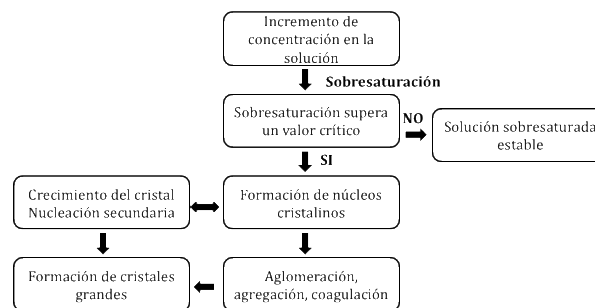


Figura 2. Etapas de cristalización [5]

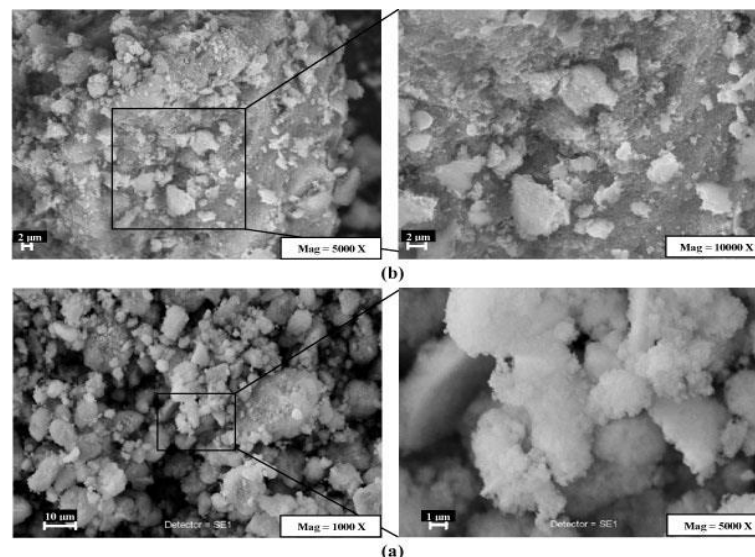


Figura 3. Micrográficas de la formación de hidroxiapatita [15]

## 3. ANTECEDENTES

El desarrollo de tecnologías para la eliminación de fósforo y nitrógeno comenzó alrededor del año de 1950 en respuesta al problema de la eutrofización y la necesidad de reducir los niveles de nutrientes que ingresaban a las fuentes superficiales de agua. La eliminación se logró inicialmente por procesos de precipitación química, que actualmente sigue siendo la tecnología líder para la eliminación de nitrógeno; no obstante, aunque la eliminación biológica del fósforo se ha establecido firmemente, la tecnología de cristalización también ha completado su progreso

hacia la comercialización y las tecnologías que extienden la precipitación química para complementar la eliminación de nutrientes [17].

El desarrollo de la tecnología de cristalización comenzó en la década de 1970, en respuesta a requisitos más estrictos de eliminación de fósforo combinados con el deseo de producir un producto final más comercializable [17]. Aunque se han presentado algunas iniciativas para el desarrollo de este proceso, los líderes en esta tecnología son los ingenieros consultores de DHV, que adaptaron su experiencia en ablandamiento de agua [18]. La cristalización, desde un punto de vista físico, es un cambio de estado que conduce, a partir de una fase líquida o gaseosa, a un sólido de estructura organizada, llamado cristal. En este proceso, se realiza un desplazamiento hacia el estado de equilibrio en unas condiciones dadas de temperatura, presión y concentración. Concretamente, los procesos de cristalización a partir de soluciones líquidas son frecuentemente utilizados en las industrias químicas, farmacéuticas, metalúrgicas y de síntesis de materiales para la producción de partículas sólidas [7].

Entre las tecnologías de cristalización se puede destacar el proceso de cristalización de estruvita, el cual alrededor del mundo está siendo ampliamente utilizado, con diferentes contextos y concentraciones de nutrientes. Algunos estudios destacados en este ámbito se pueden encontrar en España [7] y Japón [19]. La cristalización de hidroxapatita también ha sido un proceso importante que se ha venido estudiando e implementando en diferentes contextos, principalmente a escala de laboratorio [5, 14]. Sin embargo, a nivel nacional estos campos de investigación no han sido explorados a profundidad, por lo cual es escasa la información y los avances de Colombia en esta línea de investigación.

#### 4. USOS POTENCIALES

La estruvita presenta diferentes aplicaciones en la cual se destaca su uso como materia prima para la industria de fertilizantes [20]; por otro lado, puede ser utilizada como material en paneles ignífugos y en cemento. Si se desarrollan métodos de producción económicos, podría usarse en detergentes, cosméticos y alimentos para animales, en los cuales se utilizan fosfatos que pueden ser reemplazados por la estruvita. De estos usos potenciales, hasta el momento no se cuenta con evidencia que respalde que pueden ser rentables, por lo que se hace necesario incorporar estudios económicos que puedan demostrar una mayor aplicabilidad.

Entre las ventajas de la utilización de la estruvita para actividades agrícolas, se encuentra que puede ser utilizado como fertilizante de liberación lenta, lo cual permite que se pueda aplicar en altas dosis (usualmente en una única dosis) sin afectar las plantas en crecimiento, siendo recomendado principalmente para plantas ornamentales, vegetales, plantaciones forestales, césped, árboles frutales y plantas en macetas. Este fertilizante puede tener bajas tasas de lixiviación y liberar lentamente nutrientes durante la temporada de crecimiento [21]. Por otro lado, la hidroxapatita puede ser usada en la purificación del agua, producción de fertilizantes y áreas industriales y/o tecnológicas como parte de los componentes de sensores de gas, catalizadores y cromatografía; por otro lado, cuando ésta presenta una calidad adecuada para uso en las áreas médicas, tiene aplicación como complemento de implantes y prótesis de dientes y correcciones de defectos óseos [5].

#### 5. MÉTODO

##### 5.1 Descripción del sitio de estudio

El trabajo de investigación está siendo desarrollado en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Occidente, la cual se encuentra ubicada en el Municipio de Santiago de Cali, en la vía Cali-Jamundí, del Departamento del Valle del Cauca. En la Figura 4 se contextualiza la ubicación del proyecto [22].



Figura 4. Ubicación del proyecto

Como caso de estudio se está trabajando con el sistema de tratamiento de agua residual de la Universidad Autónoma de Occidente, correspondiente un sistema biológico de Lodos activados en la modalidad de aireación extendida, que trata el agua residual generada en el Campus Universitario.

## 5.2 Desarrollo experimental

1. *Etapa 1: Análisis del potencial para la formación de estruvita e hidroxiapatita.* En esta etapa se han analizado datos de revisión de literatura de las características de agua residual municipal y datos históricos de la calidad del agua residual afluente y efluente del sistema de tratamiento de agua residual de la Universidad Autónoma de Occidente (STAR-UAO), los cuales serán complementados con datos medidos en campo.

En la Tabla 1 se presentan las variables de caracterización del agua residual las cuales serán medidas cumpliendo con los lineamientos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Con esta información se ha realizado de manera preliminar el análisis estequiométrico para las reacciones de formación de estruvita e hidroxiapatita.

**Tabla 1.** Variables fisicoquímicas para la caracterización del agua residual

Variable	Unidades	Técnica de Referencia [31]
pH	Unidades	4500-H <sup>+</sup> B
Temperatura	°C	2550-A
Alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup>	2320-B
DQO	mg.L <sup>-1</sup>	5220-D
DBO <sub>5</sub>	mg.L <sup>-1</sup>	5210-DBO
Sólidos totales (ST)	mg.L <sup>-1</sup>	2540- D, E y G
Sólidos volátiles (SV)	mg.L <sup>-1</sup>	2540-D, E y G
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg.L <sup>-1</sup>	2540-D, E y G
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg.L <sup>-1</sup>	4500-NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> - A, B, C
Nitrógeno Amoniacal Total (NAT)	mg.L <sup>-1</sup>	4500-NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> - A, B, C
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	mg.L <sup>-1</sup>	4500-Norg. B
Nitritos (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg.L <sup>-1</sup>	4500- NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - A, B
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg.L <sup>-1</sup>	4500- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - A, B
Calcio (Ca <sup>+2</sup> )	mg.L <sup>-1</sup>	2340 - Dureza
Magnesio (Mg <sup>+2</sup> )	mg.L <sup>-1</sup>	2340 - Dureza
Fósforo total (P <sub>Total</sub> )	mg.L <sup>-1</sup>	4500-O-G
Ortofosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )	mg.L <sup>-1</sup>	4500-O-G

2. *Etapa 2: Definición de condiciones operacionales para la implementación de un sistema de recuperación de nutrientes en la Universidad Autónoma de Occidente.* En esta etapa se busca promover la formación de estruvita e hidroxiapatita a través de ensayos controlados de precipitación y cristalización a escala de laboratorio. Para promover la precipitación de estruvita se utilizarán tres sales: Cloruro de magnesio (MgCl<sub>2</sub>), Hidróxido de magnesio (Mg(OH)<sub>2</sub>) y Óxido de magnesio (MgO). Los ensayos tomarán como referencia estudios realizados por [5] y [7], entre otros. En la Tabla 2 se presentan las condiciones generales para los ensayos de precipitación química de la estruvita.

**Tabla 2.** Condiciones generales para los ensayos de precipitación de nitrógeno

Sal	Concentración de aplicación (mg.L <sup>-1</sup> )	pH de reacción (Unidades)
Cloruro de magnesio (MgCl <sub>2</sub> )	500 - 1000	10.0 - 11.0
Hidróxido de magnesio (Mg(OH) <sub>2</sub> )	500 - 1000	10.0 - 11.0
Óxido de magnesio (MgO)	500 - 1000	10.0 - 11.0

Para promover la precipitación de fosfato de calcio en forma de hidroxiapatita se utilizarán cuatro sales: Sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·16H<sub>2</sub>O), Cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O), Óxido de Calcio (CaO) y Óxido de magnesio (MgO). Los ensayos tomarán como referencia estudios realizados por [5] y [7], entre otros. En la Tabla 3 se presentan las condiciones generales para los ensayos de precipitación química de la hidroxiapatita.

**Tabla 3.** Condiciones generales para los ensayos de precipitación de hidroxiapatita

Sal	Concentración de aplicación (mg.L <sup>-1</sup> )	pH de reacción (Unidades)
Sulfato de aluminio (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·16H <sub>2</sub> O)	2000 - 4000	6.8 - 8.0
Cloruro férrico (FeCl <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O)	2000 - 4000	6.8 - 8.0
Óxido de magnesio (MgO)	500 - 1000	10.0 - 11.0
Óxido de Calcio (CaO)	6000	10.0 - 11.0

## 6. RESULTADOS

Parte fundamental del proceso de formación de la estruvita y la hidroxiapatita está representada en la composición de las fuentes de nitrógeno, magnesio, calcio y fosfato requeridos. La revisión de literatura general ha mostrado que la recuperación de estos cristales ha sido incorporada principalmente en sistemas de tratamiento de agua residual o en agua residual sintética con elevadas concentraciones de amonio, fósforo y magnesio. Algunos autores han reportado para el amonio concentraciones entre 58 y 87 mg. L<sup>-1</sup> [7] para el fósforo concentraciones entre 500 y 1000 mg. L<sup>-1</sup> [5] y 75 y 81 mg. L<sup>-1</sup> [7] en forma de fosfatos y para el Mg<sup>+2</sup> entre 1136 mg. L<sup>-1</sup> y 32500 mg. L<sup>-1</sup> [32], asociados principalmente a sistemas de tratamiento de lixiviados, agua residual sintética, agua residual de la industria vinícola y porcícola y sobrenadantes de sistemas anaerobios, entre otros.

Teniendo en cuenta que en el agua residual municipal estas concentraciones son significativamente menores, la primera etapa de este estudio ha estado orientada a analizar la composición de agua residual municipal y los efluentes de sistemas de lodos activados en la modalidad de aireación extendida y convencional, para comparar estos valores con el agua residual afluente y efluente del sistema de tratamiento de la Universidad Autónoma de Occidente y establecer tanto la cantidad de estruvita e hidróxiapatita que se podrán formar, como los requerimientos necesarios para promover el proceso de formación. En las Tablas 4 y 5, y en las Figuras 5 y 6, se presentan algunos valores de concentraciones de DQO, SST, NAT,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{P}_{\text{Total}}$  reportados para agua residual municipal y efluentes de diferentes sistemas de lodos activados.

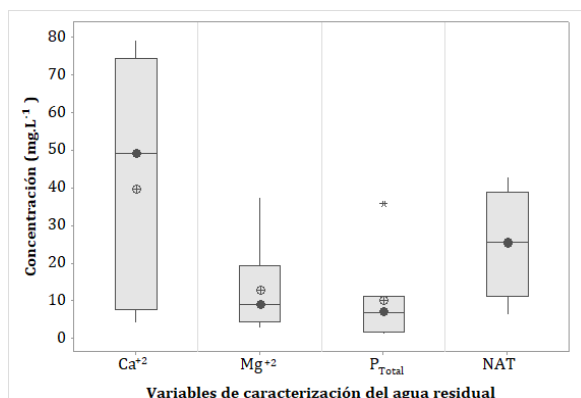
**Tabla 4.** Caracterizaciones del agua residual doméstica cruda

Autor	pH (unidades)	Variable (mg.L <sup>-1</sup> )					P <sub>Total</sub>
		DQO	SST	NAT	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	
[23]	7,5	726	314	-	12,0	4,5	11,3
[24]	6,9	-	-	6,5	49,2	12,5	1,2
[24]	7,4	223	-	26,2	79,4	37,4	1,7
[25]	-	-	331	43,1	74,4	19,3	35,9
[26]	6,9	467	270	-	4,2	2,8	2,8
[26]	9,0	519	632	-	7,8	4,8	11,1
[27]	7,0	600	1100	25,0	50,0	9,0	7,0

**Tabla 5.** Caracterizaciones de los efluentes

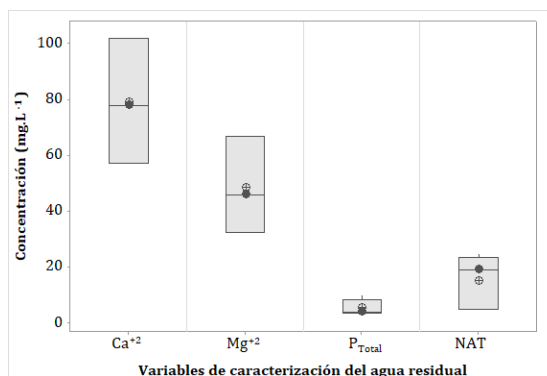
Autor	pH (Unidades)	Variable (mg.L <sup>-1</sup> )					P <sub>Total</sub>
		DQO	SST	NAT	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	
[25]	7,6	-	-	25,0	102,0	46,0	10,0
[28]	-	120	40	5,0	-	-	4,0
[28]	-	100	40	5,0	-	-	4,0
[29]	6,8	256	67	21,8	57,2	32,6	2,8
[30]*	8,3	122	32	19,1	78,0	67,0	6,6

\* Caracterización del efluente STAR-UAO



**Figura 5.** Concentración de algunas variables de calidad de agua residual municipal

Los valores reportados permiten observar que las variables con concentraciones menores son el ion magnesio y el fósforo total; por lo tanto, teniendo en cuenta que la relación molar de  $\text{Mg}^{+2}:\text{PO}_4^{-3}:\text{NH}_4^+$  debe ser de 1:1:1 para la formación de la estruvita, se puede analizar que los compuestos limitantes tanto en el agua residual municipal como en los efluentes de lodos activados en las dos modalidades analizadas, pueden ser el ion fosfato o el ion magnesio, por lo tanto es necesario adicionar sales de magnesio y fósforo que permitan aumentar estas concentraciones y conlleven a una mayor utilización del amonio que es el que se encuentra en mayor proporción en agua residual.



**Figura 6.** Concentración de algunas variables de calidad de efluentes de sistemas de lodos activados convencional y aireación extendida para el tratamiento de agua residual municipal

Para el caso de la formación de hidróxiapatita, la relación molar entre  $\text{Ca}^{+2}:\text{PO}_4^{-3}$  debe ser de 10:6; mostrando que para este caso el compuesto limitante podría estar asociado principalmente al ion fosfato, haciendo necesario el uso

de sales de fosfato que permitan aumentar estas concentraciones para el aprovechamiento del calcio presente en el agua residual.

Estos resultados muestran de preliminar que para promover la recuperación de nitrógeno y fósforo a partir de un sistema de tratamiento existente es necesario identificar la etapa del sistema en que se puede aplicar la recuperación de estruvita o hidroxiapatita, ya que para la recuperación de nitrógeno que la etapa que podría ser la más adecuada para recuperar la estruvita es en la etapa inicial del proceso (Afluente) ya que presenta mayores concentraciones de amonio potencialmente aprovechable, mientras que para la recuperación de hidroxiapatita o fosfatos de calcio, la etapa más apropiada podría ser al final del proceso (Efluente) ya que presenta menores interferencias respecto al material particulado para el cual se ha reportado que puede afectar la calidad del precipitado.

## **7. CONCLUSIONES**

Frente a la revisión de literatura y en contraste con la calidad del agua residual, se tiene identificado que las variables que requieren mayor ajuste para promover la formación de estruvita e hidroxiapatita son las fracciones molares de  $Mg^{+2}$ :  $PO_4^{-3}$ ,  $NH_4^+$ :  $PO_4^{-3}$  y  $Ca^{+2}$ : $PO_4^{-3}$ , ya que las proporciones presentes en el agua residual no son suficientes para promover una adecuada formación de estos compuestos, siendo necesario la adición de una fuente externa de magnesio para el caso de la formación de estruvita y fosfato para el caso de la hidróxiapatita.

Al finalizar este proyecto de investigación se espera establecer de manera específica la cantidad de nitrógeno y fósforo potencialmente recuperable y con qué tipo de agua residual sería más viable trabajar y obtener elementos para proponer en qué etapa del proceso de tratamiento se podría incorporar la precipitación de nutrientes.

Se espera establecer las proporciones de insumos químicos a utilizar en el proceso de recuperación de nutrientes, que permitan tanto la recuperación de estruvita y/e hidroxiapatita como el cumplimiento de los requerimientos de calidad para el vertimiento de efluentes, de acuerdo con la normatividad ambiental aplicable, que para Colombia está establecida en el Decreto Único Sectorial 1076 de 2017 y la Resolución 0631 de 2015.

## REFERENCIAS

- [1] OMS (2016). *El agua*. Online [Nov 2017].
- [2] Tre'panier, C. et al. (2002). Phosphorus budget as a water quality management tool for closed aquatic supernatant. *Water Research* 36(4), 1007-1017.
- [3] Burke, S., Heathwaite, L. & Preedy, N. (2004). Transfer of phosphorus to surface waters; eutrophication. Phosphorus in environmental technology: Principles and applications. Master Thesis. University of Waterloo.
- [4] Molinos, M., Sala, R. & Hernández, F. (2010). Estudio de viabilidad del proceso de recuperación del fósforo contenido en las aguas residuales: Una aproximación económica. *Rect@* 11(1), 179-192.
- [5] Vasconcelos, C. (2013). Estudio de la cristalización y recuperación de hidroxiapatita en un reactor de tanque agitado. Documento de trabajo. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [6] Tarayre, C. et al. (2016). New perspectives for the design of sustainable bioprocesses for phosphorus recovery from waste Bioresource technology. *Tecnología Bioresource* 206, 264-274.
- [7] Alcañiz, L. (2008). Estudio de la precipitación y recuperación del fósforo presente en las aguas residuales en forma de estruvita ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- [8] Wu, Q. & Bishop, P. (2004). Enhancing struvite crystallization from anaerobic supernatant. *Journal of Environmental Engineering and Science* 3(1), 21-29.
- [9] Hutnik, N. et al. (2016). Effect of continuous crystallizer performance on struvite crystals produced in reaction crystallization from solutions containing phosphate (V) and zinc (II) ions. *Revista Brasileña de Ingeniería Química* 33(2), 307-317.
- [10] Doyle, J. & Parsons, S. (2002). Struvite formation, control and recovery. *Water research* 36(16), 3925-3940.
- [11] Ohlinger, K., Young, T. & Schroeder, E. (1999). Kinetics effects on preferential struvite accumulation in wastewater. *Journal of Environmental Engineering* 125(8), 730-737.
- [12] Bouropoulos, N. & Koutsoukos, P. (2000). Spontaneous precipitation of struvite from aqueous solutions. *Journal of Crystal Growth* 213(3-4), 381-388.
- [13] Snoeyink, V. & Jenkins, D. (1980). *Water chemistry*. John Wiley.
- [14] Hidalgo, G. (2014). Phosphorus recovery as hydroxyapatite (HAP) from urban wastewaters using nanofiltration and reverse osmosis brines. Universitat de Barcelona.
- [15] Rival, J., Fetterl, G. & Boschll, P. (2011). Efecto del pH en la síntesis de hidroxiapatita en presencia de microondas. *Revista Matéria* 15(4), 506-515.
- [16] Bouyer, E., Gitzhofer, F. & Boulos, M. (2000). Morphological study of hydroxyapatite nanocrystal suspension. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 11(8), 523-531.
- [17] Morse, G. et al. (1998). Phosphorus removal and recovery technologies. *Science of the total environment*, 212(1), 69-81.
- [18] Dijk, J. & Eggers, E. (1987). Removal of phosphate at sewage treatment plants in a fluidised bed reactor. *H2O* 20(3), 63-68.
- [19] Mitani, Y. et al. (2003). Struvite recovery from wastewater having low phosphate concentration. *Journal of Water and Environment Technology*, 1(1), 13-18.
- [20] Gaterell, M. et al. (2000). An economic and environmental evaluation of the opportunities for substituting phosphorus recovered from wastewater treatment works in existing UK fertiliser markets. *Environ. Technol* 21, 1067-1084.
- [21] Johnston, A. & Richards, I. (2003). Effectiveness of different precipitated phosphates as phosphorus sources for plants. *Soil Use Manage. Journal of Environmental Engineering and Science* 3, 21-29.
- [22] <http://geoportalligac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=7>
- [23] Quintero, J., Murillo, W. & Cerón I. (2017). Use of thermal water as a natural coagulant for domestic wastewater sustainable treatment. *Revista Facultad de Ingeniería* 26(44), 33-43.
- [24] Patel, D. & Kanungo, V. (2010). Phytoremediation potential of duckweed (*lemnaminor* l: A tiny aquatic plant) in the removal of pollutants from domestic wastewater with special reference to nutrients. *Bioscan* 5(3), 355-358.
- [25] Mujeriego, R. (1990). Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada. Junta de Sanejament de la Generalitat de Catalunya.
- [26] Niño, E. & Martínez, N. (2013). Estudio de las aguas grises domésticas en tres niveles socioeconómicos de la ciudad de Bogotá. Documento de trabajo de grado. Universidad Pontificia Javeriana.
- [27] Von Sperling, M. (2012). Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales. Universidad de Nariño.
- [28] Von Sperling, M. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. IWA Publishing.
- [29] EMCALI (2017). Reporte ejecutivo de operación primer semestre 2017. PTAR Cañaveralejo. Cali.
- [30] Giraldo, K. (2018). Diagnóstico de la situación actual de la planta de tratamiento de agua residual de la Universidad Autónoma de Occidente. Documento de trabajo de grado. Universidad Autónoma de Occidente.
- [31] APHA, AWWA y WEF (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association.
- [32] Katakai, S. et al. (2016). Phosphorus recovery as struvite: Recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. *Resources, Conservation and Recycling* 107, 142-156.

# Análisis de la calidad del recurso hídrico superficial de la microcuenca del río El Palmar (municipio de Ubaque, Cundinamarca) y exploración de la sostenibilidad ambiental de las otras microcuencas de Cundinamarca

Kimberly González B.<sup>1</sup>

Diana C. Santamaria S.<sup>2</sup>

Gilberto Vallejo M.<sup>3</sup>

Universidad Libre  
Bogotá – Colombia

El agua es el líquido vital de los seres vivos y lo estamos agotando de manera exagerada. Colombia es catalogado un país con una oferta hídrica y de biodiversidad amplias, estatus que ha venido perdiendo en las últimas dos décadas. A finales del siglo XX, Colombia ocupó el cuarto lugar en el mundo por disponibilidad per cápita de agua, mientras que, a principios del presente siglo, de acuerdo con el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo “Agua para todos - agua para la vida” Colombia ocupa el puesto 24 entre 203 países. La causa de la pérdida de ese puesto, con relación a dicho indicador, “se debe principalmente al aumento de la población y el consecuente crecimiento de las actividades productivas [1]. Teniendo en cuenta lo anterior, en el siguiente artículo se presentan algunos resultados preliminares obtenidos del trabajo con la comunidad, al igual que a la realización del primer monitoreo año 2017 y la priorización de algunas microcuencas representativas de Cundinamarca; teniendo en cuenta que la investigación está basada en un proyecto macro enfocado en la generación de un modelo de sostenibilidad de microcuencas que se alimenta de la información generada por este proyecto el cual se desarrolló en la microcuenca piloto (microcuenca del Río El Palmar) y otras microcuencas representativas en cuanto a características significativas y similares a la piloto, ubicadas en el departamento de Cundinamarca.

## 1. INTRODUCCIÓN

El río el Palmar se encuentra ubicado en el municipio de Ubaque en el departamento de Cundinamarca, nace en el alto de los Tunjos a la altura de la cota 3500 m.s.n.m y luego de un recorrido de 20.5 Km. entrega sus aguas al río Negro a la altura de la cota 1460 m.s.n.m. presenta un cauce medianamente amplio y bien definido, donde el lecho mayor o de aguas altas tiene un ancho de 2 a 5 m, limitado a lado y lado con laderas de alta pendiente y de sabana en la parte baja. (2) Por otro lado el río El Palmar es una unidad hidrográfica que para efectos de este proyecto se denominara microcuenca coincidiendo con la codificación de cuencas del IDEAM Y el POMCA del Río Negro. El estudio de caso, la microcuenca del Río El Palmar (Ubaque, Cundinamarca) en la cual se centra la situación problema, es aquella típica del nivel nacional en torno a las microcuencas, como la contaminación del recurso, las deficiencias de la conceptualización y la gobernabilidad.

La calidad del recurso hídrico de la microcuenca piloto afectada actualmente, el uso poco racional del recurso y su disminución; en síntesis, la oferta hídrica del país viene siendo afectada tanto en cantidad como en calidad, en unas regiones más que en otras, aunque con un nivel generalizado de preocupación, máxime si se piensa en los factores de mayor incidencia: desertificación, contaminación, pérdida y degradación de la biodiversidad, cambio climático y variabilidad climática y demandas crecientes de su oferta, problemas ambientales catalogados como globales tanto en la actualidad como en las proyecciones de corto y largo plazo. Un factor no menos importante, la baja participación de la sociedad civil en su cuidado e iniciativas de uso responsable, a lo cual se suman algunos aspectos cualitativos que se derivan también del estado de las normas y los instrumentos, claves al momento de investigar las microcuencas, algunos de ellos es la importancia a nivel de oferta, demanda y riesgo, definición conceptual clara, inventario a nivel regional y escala de trabajo.

El método que acompañará la investigación es el cualitativo, en lo social, y cuantitativo, en razón a que serán hechas mediciones, con el uso preferente de información secundaria y rápida comprobación en campo. Lo desarrollado conducirá a obtener productos como, documentos que permitan conocer sobre los involucrados con la participación, las características de la calidad del recurso hídrico de la microcuenca piloto y las condiciones de sostenibilidad ambiental de un grupo de microcuencas, seleccionadas según unos criterios específicos de representatividad en el departamento de Cundinamarca; cartografía a escala adecuada, con la localización de la microcuenca y de los drenajes estudiados, al igual que la ubicación de las microcuencas priorizadas a nivel del Departamento de Cundinamarca.

El problema de investigación se enmarco en dos visiones, una específica, las necesidades de un proyecto macro de investigación del Grupo Tecnoambiental del profesor Gilberto Vallejo Moreno: "Modelo para la sostenibilidad ambiental de microcuencas hidrográficas: estudio de caso, la microcuenca del Río el Palmar (municipio de Ubaque, Cundinamarca)" en el cual, se espera que este proyecto aporte información, datos y estadísticas, resultados, conclusiones y recomendaciones, de utilidad para la investigación, con énfasis en dos de sus objetivos específicos:

---

<sup>1</sup> kimberlyd-gonzalezb@unilibre.edu.co

<sup>2</sup> dianac.santamarias@unilibrebog.edu.co

<sup>3</sup> gilberto-vallejom@unilibre.edu.co

- Identificar temas claves que por su importancia representen un valor estratégico, tanto para la caracterización de la problemática y potencialidades de la microcuenca en su condición actual, como para la evaluación y análisis de la problemática socio ambiental, para ser llevados a un diagnóstico de sostenibilidad local –regional.
- Proponer una Guía de Plan de Manejo Ambiental, de condiciones mínimas, para la microcuenca del Río El Palmar, con el propósito de que se convierta en un Determinante Ambiental clave para su ordenamiento ambiental y el de las microcuencas del país. [3].

## 2. PROBLEMÁTICAS

### 2.1 Entorno al recurso hídrico

El agua es el líquido vital de los seres vivos y lo estamos agotando de manera exagerada. Colombia es catalogado un país con una oferta hídrica y de biodiversidad amplias, estatus que ha venido perdiendo en las últimas dos décadas. A finales del siglo XX, Colombia ocupó el cuarto lugar en el mundo por disponibilidad per cápita de agua, mientras que, a principios del presente siglo, de acuerdo con el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo “Agua para todos - agua para la vida” Colombia ocupa el puesto 24 entre 203 países. La causa de la pérdida de ese puesto, con relación a dicho indicador, “se debe principalmente al aumento de la población y el consecuente crecimiento de las actividades productivas [4].

De otro lado, el país viene presentando situaciones negativas y hasta conflictos que preocupan a las Autoridades Ambientales –AA nacionales, regionales y a las municipales, al igual que a los expertos y estudiosos de dichos asuntos. Con relación a la demanda potencial de agua por sectores, la mayor demanda corresponde al uso agrícola, con 7640 millones de metros cúbicos (61% con relación al total), mientras que el sector doméstico, el más prioritario en términos de sostenibilidad, consume el 26% con un ingrediente adicional, que la mayor demanda está concentrada en las principales capitales [5].

En síntesis, la oferta hídrica del país viene siendo afectada tanto en cantidad como en calidad, en unas regiones más que en otras, aunque con un nivel generalizado de preocupación, máxime si se piensa en los factores de mayor incidencia: desertificación, contaminación, pérdida y degradación de la biodiversidad, cambio climático y variabilidad climática y demandas crecientes de su oferta, problemas ambientales catalogados como globales tanto en la actualidad como en las proyecciones de corto y largo plazo.

Muchos de los problemas descritos para el recurso hídrico del país, se presentan por el mal manejo y la explotación poco racional de los recursos naturales de las regiones de alta montaña, paisajes caracterizados por la presencia de las principales fuentes de agua (y evaporación) y ecosistemas asociados - como es el caso de los páramos - debido a que allí se da una interacción permanente entre los elementos del paisaje con la circulación atmosférica [6], siendo las microcuencas uno de los principales elementos por su carácter de unidades naturales. Factores como el ascenso de la frontera agrícola por las laderas de los principales sistemas montañosos y la minería (inclusive en zonas de páramo), contribuyen de forma importante con dichos problemas. Es preciso anotar, al destacar los paisajes de montaña, que estudiar ambiental, ecológica y culturalmente a Colombia y más de la mitad de sus regiones, es considerar que poseemos un territorio con tres cordilleras y que de ellas se deriva la sostenibilidad de las demás regiones, llanuras, sabanas, valles y corredores de litoral.

### 2.2 Entorno a las microcuencas

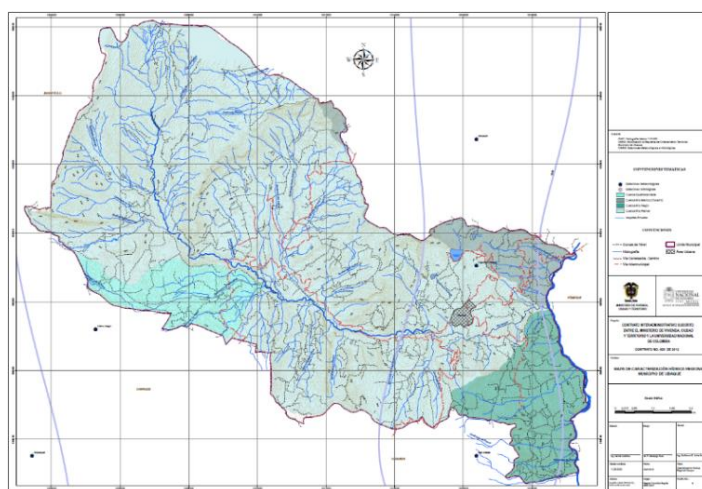
La problemática se ubica, en el alcance y la forma como, la normatividad y los instrumentos para la gestión socioambiental – territorial en Colombia, definen a las microcuencas, es así como, las normas que reglamentan la protección y conservación, el uso y el aprovechamiento del recurso hídrico: política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico PNGIRH y el Decreto reglamentario de cuencas [7], especialmente este último, son las únicas que le otorgan una importancia relativa a dicha unidades hidrográficas, mientras que otras normas, por ejemplo, el decreto 2372 de 2010 que establece el Sistema Nacional de Áreas Protegidas y el Decreto 0953 de 2013 para los Esquemas de Pago por Servicios Ambientales, entre las dos citan solo una vez el tema.

El estudio Nacional del Agua [8] y los Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional del Agua ERA [9], solo hacen referencia a las microcuencas en tres oportunidades, dos de ellas para retomar lo que la PNGIRH ha establecido y la otra para destacar un estudio realizado para una región de la Amazonia. A lo anterior se suman los siguientes aspectos cualitativos derivados también del estado de las normas y los instrumentos, claves al momento de pensar en las microcuencas como objeto de investigación para la sostenibilidad:

- No todas las microcuencas del territorio nacional tienen el mismo nivel de importancia, al momento de su selección en relación con oferta, demanda y calidad hídrica, riesgos y gobernabilidad.
- No cuentan con una definición clara, como si la tienen las cuencas.
- No se cuenta aún con un inventario de las mismas, ni siquiera a nivel regional, como si se tiene para las cuencas.
- Las microcuencas a que hace referencia el artículo 57 de la ley 1640 de 2012, son objeto de Plan de Manejo Ambiental – PMA. Sin embargo, por parte del MADS solo ha sido promulgado un documento borrador del instrumento que orientará su elaboración, es decir, la Guía para PMA, mientras que los Acuíferos ya lo poseen.



- La participación de la sociedad civil es altamente restringida y hasta condicionada, reducida a unas Mesas de Trabajo, mientras que para los POMCA la misma norma establece la figura de los Consejos de Cuenca, mucho más amplia en su concepción como espacio o mecanismo de participación.
  - A pesar de que existe una Guía para PMA de Acuíferos, su contenido y alcance apenas pueden orientar aquellos aspectos generales de los PMA para Microcuencas.
  - La escala de trabajo es 1:10.000, en comparación con 1:25.000 para las cuencas de mayor detalle, lo que técnicamente se traduce en un mayor nivel de conocimiento de su territorio, entre otros aspectos, asunto por demás positivo.
1. *Problemática de la microcuenca del Río El Palmar.* El río el Palmar nace en el alto de los Tunjos a la altura de la cota 3500 m.s.n.m y luego de un recorrido de 20.5 Km. entrega sus aguas al río Negro a la altura de la cota 1460 m.s.n.m. presenta un cauce medianamente amplio y bien definido, donde el lecho mayor o de aguas altas tiene un ancho de 2 a 5 m., limitado a lado y lado con laderas de alta pendiente y de sabana en la parte baja [10] (Figura 1). Por otro lado, El Palmar es una unidad hidrográfica que para efectos de este proyecto se denominara microcuenca coincidiendo con la codificación de cuencas del IDEAM Y el POMCA del Rio Negro.



**Figura 1.** Recurso hídrico del municipio de Ubaque [11]

El municipio de Ubaque, entre tanto, se encuentra conformado por 21 veredas y el centro urbano, agrupadas en tres zonas, con características similares de población, geográfica y economía y los cuales cubren una extensión total de 104.82 km<sup>2</sup> y su población es 98% rural. [12] su topografía, como casi toda la provincia de Cundinamarca, es ondulada, suelos aptos para el sostenimiento de ecosistemas de alta montaña, y su economía se basa principalmente en la ganadería y la agricultura, la cual está bastante diversificada dada la variedad de climas ya que se puede cosechar desde productos de clima frío como papa o arveja, hasta los de clima cálido como yuca o cítricos [13].

En el contexto de la problemática de las microcuencas del país, en general, y de la microcuenca del Río El Palmar, en particular, se presentan unas situaciones algunas relacionadas con problemáticas que se espera abordar desde el proyecto mayor de investigación, es decir, el modelo de sostenibilidad, y con las cuáles debe contribuir este proyecto; una situación, es la baja participación de la sociedad civil en las decisiones que afectan la sostenibilidad del territorio del municipio de Ubaque, y la inexistencia de una base de datos que identifique y clasifique a los involucrados, y que se encuentre disponible para futuras iniciativas que requieran de su concurso; la baja participación y la inexistencia de la base de datos, puede decirse que son a la vez causa y efecto de un mismo problema, las deficiencias de la gobernabilidad socioambiental del municipio y la baja gobernabilidad en el municipio conduce a que, por ejemplo, no se obtengan diagnósticos participativos, que consulten a los actores y usuarios sobre la problemática y las potencialidades socioambientales de la microcuenca y tampoco las posibles soluciones a los primeros. [14]

Como se ha expresado, la microcuenca del Río El Palmar padece una serie de problemas ambientales, entre ellos, algunos asociados al recurso hídrico vital para la sostenibilidad económica y ambiental de su territorio. Disminución de caudales disponibles y contaminación, constituyen los principales tanto para los cuerpos de agua lenticos como loticos. Con relación a la calidad del recurso del Río El Palmar, la resolución No. 300.41.11.2116 de diciembre de 2011 de Corporinoquia [15] ha identificado:

- Que la Corporación ha priorizado la microcuenca del Río El Palmar (...) por la fuerte intervención antrópica en el ejercicio de prácticas poco amigables al medio ambiente y por la demanda caótica del recurso (...).
- El estado de la calidad en la cuenca alta, hasta la desembocadura de la Q. El Saltador, es buena. También lo es el tramo que le sigue hasta el Puente sabanilla, mientras que de aquí y hasta la desembocadura de la Q. Salitre, aunque se presentan sólidos totales y coliformes totales y fecales, la cantidad del oxígeno es buena.

- La cuenca media – baja y la baja, presentan condiciones que limitan el uso del recurso del río (v. gr. para los usos agrícola y pecuario), por el incremento de sólidos totales y coliformes fecales y totales que sobrepasan los límites fijados por la norma (Decreto 1594 de 1984 y Decreto 3930 de 2010).

Es de tener en cuenta, que el Río El Palmar surte varias demandas, entre ellas el acueducto de la cabecera urbana y siete usuarios más, rurales, entre acueductos y distritos de riesgo, y que la resolución centró sus análisis únicamente en el cauce principal, no en los afluentes, asunto pendiente por revisar, si se quiere conocer de forma más integral la calidad del agua de la cuenca inclusive pensando en acciones de manejo y control, también integrales. Por esta razón es que el segundo objetivo de este proyecto, busco generar información no solo del cauce principal, si no de los afluentes principales, tomando una cobertura más amplia del sistema hídrico de la zona para obtener así un análisis más integral en cuanto a la calidad de agua.

2. *¿Por qué la microcuenca del Río El Palmar?* La microcuenca del Río El Palmar, posee muchas características que la hacen representativa de las condiciones típicas de las microcuencas del país, particularmente del sistema de las cordilleras, entre ellas: estar situada en zona de montaña, en altitudes que la hacen poseedora de diferentes pisos térmicos, incluyendo el páramo; presenta condiciones de clima y ecosistemas que favorecen la oferta hídrica, pero al mismo tiempo, padece de problemas importantes de contaminación y mal uso del recurso; los riesgos de remoción en masa, en particular, son evidentes; existencia de situaciones que permiten inferir debilidades en la gobernabilidad socioambiental del municipio y la microcuenca, y finalmente, para destacar el hecho de que aproximadamente el 83% de la superficie del municipio corresponde al área de la microcuenca, lo que la hace altamente representativa de su situación socioambiental actual y futura, en otras palabras, hablar de la sostenibilidad ambiental de dicha microcuenca, es referirse a la del municipio de Ubaque.

### 3. MARCO CONCEPTUAL

En la Tabla 1 se relacionan conceptos que centralizan la temática específica de la investigación y nos da un mejor enfoque para profundizar en cuanto al recurso hídrico y su calidad.

**Tabla 1.** Conceptos de contextualización

Concepto	Fuente
El recurso hídrico incluye el agua en todas las etapas del ciclo hidrológico, juntamente con toda la biodiversidad que esta soporta, tal como los peces, los anfibios, la flora. La interdependencia de estos elementos, así como el ciclo hidrológico que estos generan, tal como la evaporación, la transpiración, la humedad del suelo, el agua superficial y freática, el agua costera y marítima, dentro de una perspectiva integral, sustentada por las unidades hidrológicas básicas, las cuencas y los acuíferos, definen el potencial hídrico de una región.	[16]
La microcuenca se define como una pequeña unidad geográfica donde vive una cantidad de familias que utiliza y maneja los recursos disponibles, principalmente suelo, agua y vegetación. Desde el punto de vista operativo, la microcuenca posee un área que puede ser planificada mediante la utilización de recursos locales y un número de familias que puede ser tratado como un núcleo social que comparte intereses comunes (agua, servicios básicos, Infraestructura, organización, entre otros).	[17]
El territorio para efectos de los procesos de desarrollo, el territorio es el escenario físico y ambiental en el cual toman forma y dinámica y convergen dichos procesos. El territorio se constituye, así, en el elemento integrador y estructurante de los objetivos y políticas públicas, al igual que de la acción y gestión que sobre él ejercen los actores sociales y económicos, quienes con sus dinámicas configuran y reconfiguran los espacios geográficos. El territorio es, entonces, más que un mero receptáculo o soporte físico de las actividades sociales, económicas y culturales del hombre, constituyendo por tanto una construcción social e histórica, resultado de las relaciones sociales que se expresan en diversas formas de uso, ocupación, apropiación y distribución del territorio.	[18]
La sostenibilidad ambiental (o sostenibilidad propiamente dicha) es inherente al Desarrollo Sostenible por lo que se basa en un criterio de equidad intergeneracional de acceso y disfrute de los recursos naturales y de los servicios que de ellos se derivan. Para su estudio puede ser clasificada en: económica, social y ambiental, la más importante para la evaluación de problemas o impactos ambientales; el uso de indicadores constituye una de las prácticas para su estudio.	[19]
Una guía técnica es un documento que contiene la información básica y las instrucciones o pasos de tipo práctico que se consideran convenientes para el logro de un objetivo.	[20]
La suma de factores que alteren o conserven un cuerpo de agua determinan así mismo lo que es la calidad de agua, en ello interfieren procesos de erosión o bien sea de origen natural o por acción del hombre teniendo aumento día a día	[21]

### 4. MÉTODO

Se estableció un enfoque metodológico cualitativo en lo social, en la medida que el sujeto de investigación es la comunidad, y cuantitativo, teniendo en cuenta que el objeto, en este caso las microcuencas, fue y será sometido a mediciones:

- A través el método de participación que se desarrolla para la apropiación social del conocimiento, el cual proporciona los instrumentos a utilizar para la captura de la información.
- Se Identificaron y definieron los seis puntos de la microcuenca donde se realizó y se realizara dos monitoreos de calidad de agua de análisis fisicoquímicos y uno de análisis hidrobiológico; en diferentes años (2017 - 2018).
- Se realizó el monitoreo de calidad de agua en los puntos priorizados y posteriormente la comparación con la resolución No. 300.41.11.2116 de diciembre de 2011, de Corporinoquia y la Resolución 2115 de 2007 “Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”.

- Se identificaron los criterios de selección de las microcuencas más representativas de Cundinamarca, teniendo en cuenta las características de la microcuenca piloto, para aportar información al modelo de sostenibilidad propuesto en el proyecto macro de investigación.
- A partir de información secundaria se tomaron datos de área, zonas de vida, riesgos y conflictos en este mismo orden se brindó prioridad de selección a cuerpos de agua con área superior a 150 Has, consecuente a ello que contengan diferentes zonas de vida o pisos térmicos específicamente característicos de la microcuenca piloto Rio El Palmar y finalmente pero no menos importante con presencia de riesgos y conflictos todo esto con el propósito de tener un referente en el estado de las microcuencas en Cundinamarca.
- Se realizó selección por medio del sistema ArcGis, con la capa de división política de Cundinamarca del portal del DANE, en el proceso se realizó intersección de cada microcuenca con los municipios donde fueran localizados cuerpos de agua con las características de una microcuenca por medio de esta herramienta que nos permite obtener el área siendo el primer criterio de selección, seguido a ello se realizó interpretación de coberturas y uso del suelo con el fin de obtener zonas de vida y posibles conflictos que se presentaran en las zonas que fueron seleccionadas con los primeros criterios.
- Se identificaron las subcuencas de la jurisdicción de Corpoguavio (departamento de Cundinamarca) según municipios y se documentan noticias de los medios de comunicación, con relación a los municipios que en Colombia y en particular en Cundinamarca, que han venido siendo afectados por riesgos naturales (de inundación, remoción en masa e incendios forestales) y escasez de agua.

La Corporación Autónoma Regional de Orinoquia, quien tiene jurisdicción sobre la microcuenca del río el palmar, expidió la resolución No. 300.41.11.2116 de diciembre de 2011, "Por la cual se reglamenta la corriente de uso público denominada la Microcuenca "Rio Palmar" localizada en el municipio de Ubaque, Departamento de Cundinamarca y se toman otras disposiciones" [22]; la cual contiene perfiles de calidad de agua dividida en ocho tramos, priorizando algunos parámetros; siendo esto importante, ya que fue un punto de referencia con el que se pudo verificar y comparar cada uno de los datos generados en la investigación.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Identificación de actores más representativos de la microcuenca

La identificación de los actores permitió empoderar y asociar a la comunidad del municipio de ubaque con el proyecto, para que de este modo sean ellos quienes se encarguen de la protección de la microcuenca y de los recursos que esta posee. La metodología de participación permitió identificar: los involucrados, su grado de organización, su distribución en el territorio y de ser posible su descripción, mediante instrumentos que permiten obtener información individual y conjunta, integrando así la sociedad civil y las autoridades locales.

Con este fin se obtiene una base de datos con información de aquellos actores más representativos de la región y de la microcuenca, quienes son los que, mediante el trabajo participativo, identifican las actividades económicas que se llevan a cabo en la región, los puntos críticos en cuanto a calidad ambiental y las potencialidades de la microcuenca, para esta se priorizaron los sectores que más tienen que ver con el recurso hídrico, de todos ellos se obtuvo una base de datos, la cual contiene información como nombre, teléfono, correo electrónico, organización y/o institución a la que pertenece, vereda, quebrada más próxima a lugar de residencia, con el fin de realizar periódicamente actividades encaminadas a la protección, cuidado y aprovechamiento del recurso.

**Tabla 2.** Actores más representativos de la microcuenca del río EL Palmar [23]

Actores	Relación con la microcuenca o la comunidad
110	JUNTAS DE ACCIÓN COMUNAL Sector urbano los sauces, Veredas Cacique, Centro Afuera, Cruz Verde, Belén, Fistega, Guanco, Guayacondo, Luciga, Puente Amarillo, Molino, Pueblo Viejo, Puente Amarillo, Rio Negro, Romero Alto, Romera Bajo, San Roque, Santa Ana Alta, Santa Ana Baja, Santa Rosa, Sabanilla y San Agustín.
34	DISTRITOS DE RIEGO Asuaru, asocacique, Asoesperanza, asoriego el porvenir, asodat - roca, Asodisriego
2	ALCALDIA DE UBAQUE Director de la UMATA, acueducto municipal y servicios públicos de la alcaldía
2	INSTITUCIONES EDUCATIVAS Escuela Belén, escuela de Fistega
70	COMUNIDAD EN GENERAL Comunidad que no se encuentra asociada a ninguna organización y personas que desarrollan otros proyectos en el municipio

La Tabla 2 contiene la cantidad de personas que integran dicha base de datos teniendo en cuenta su relación con la microcuenca, ya sea, organización, institución, junta de acción comunal, funcionario de la alcaldía, Distritos de riego, entre otros. Cada una de las personas que se encuentran en la base de datos, tiene una participación importante en el desarrollo del proyecto, se obtuvo la información de los que diariamente se relacionan con los recursos naturales de la microcuenca, son ellos quienes nos proporcionan datos de puntos de mayor riesgo, actividad agrícola, uso de sustancias de síntesis, asentamientos, análisis de aguas ya realizados en la zona y todas aquellas variables que permitieron identificar el estado de la microcuenca y las medidas de acción para cada uno de los casos.

## 5.2 Red de monitoreo

Teniendo un listado de quebradas previamente identificadas, se realizó junto al director de la UMATA una selección de 6 puntos de monitoreo teniendo en cuenta criterios como:

- Dos puntos que se hayan identificado como de mayor impacto, en actividades económicas y en calidad de agua.
- Dos puntos que se hayan identificado como de menor impacto, en actividades económicas y en calidad de agua.
- Por lo menos 3 de ellos deben estar ubicados en quebradas que alimenten el río el Palmar.
- Un punto debe estar ubicado antes de la desembocadura del río el Palmar al río Negro.
- Uso del suelo en la zona para cada punto de muestreo.

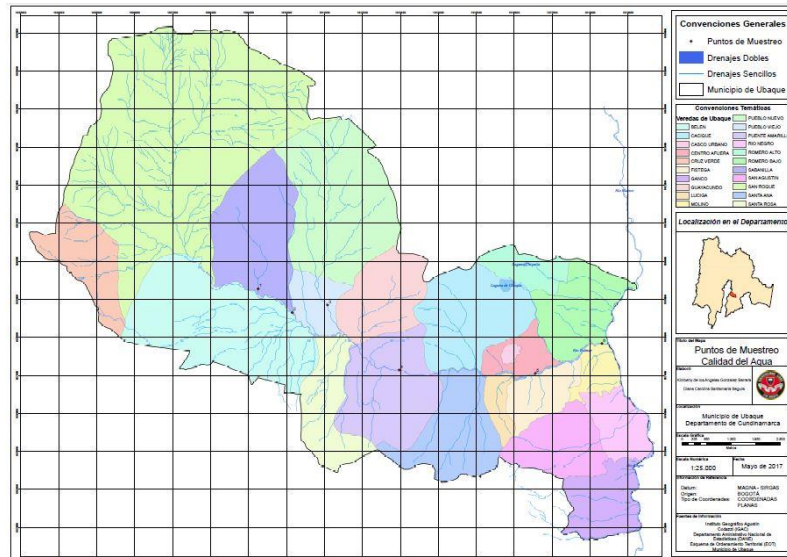


Figura 2. Localización de los puntos de muestreo [24]

La resolución de Corporinoquia, mencionada anteriormente, fue base esencial para el desarrollo del objetivo de calidad de agua, ya que fue un punto de comparación a través del tiempo y brindó una guía tanto de calidad como de orientación para la escogencia de parámetros a medir y puntos de muestreo. En la Tabla 3 se evidencian aquellos parámetros que se realizaron en el muestreo, se complementó este a los que contenía la resolución base (Corporinoquia) para generar validez, al igual que en comparación con esta se adicionaron más puntos de muestreo con el fin de conseguir un análisis integral de la microcuenca.

Tabla 3. Parámetros de medición

Parámetros medidos por la resolución de Corporinoquia	Parámetros adicionales para la investigación
DBO5	Dureza
DQO	Acidez
OD	Alcalinidad
Sólidos Suspendidos Totales	Conductividad
Turbidez	Caudal
Coliformes Fecales	ORP
pH	
Temperatura	

## 5.3 Análisis de muestras

El primer monitoreo se realizó el día 2 de mayo de 2017, se midieron las variables in situ y se tomaron las muestras para su posterior análisis, estos fueron analizados en los laboratorios de la universidad Libre, sede bosque popular. A continuación, se presenta la comparación de los resultados obtenidos tanto con la resolución No. 300.41.11.2116 de diciembre de 2011, de Corporinoquia y la Resolución 2115 de 2007 “Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano” [25] (Figuras 1 a 10) [26].

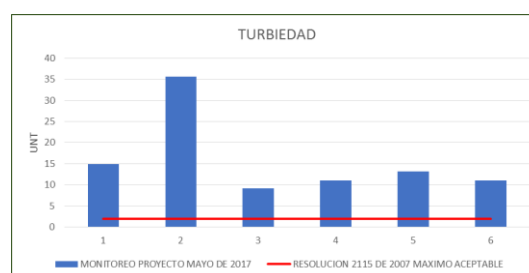
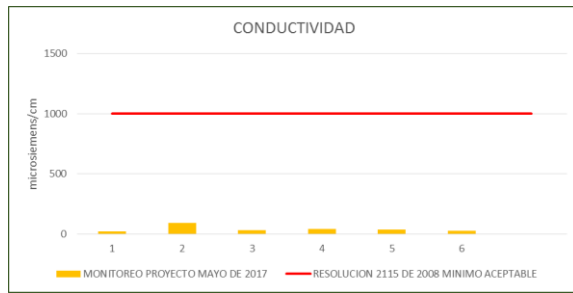
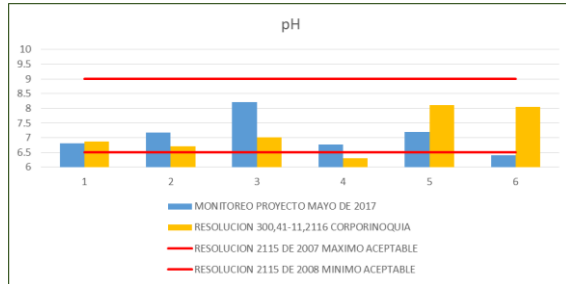


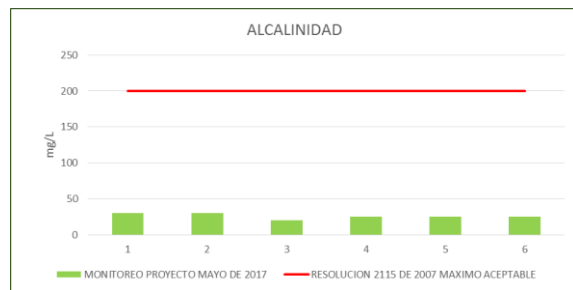
Figura 1. Turbiedad



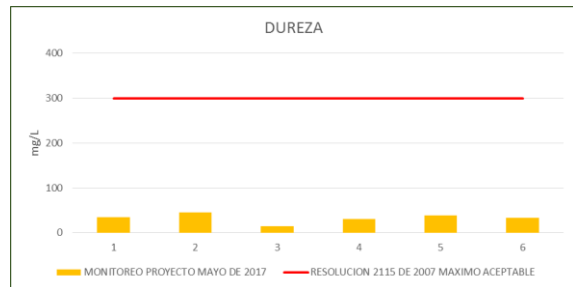
**Figura 2. Conductividad**



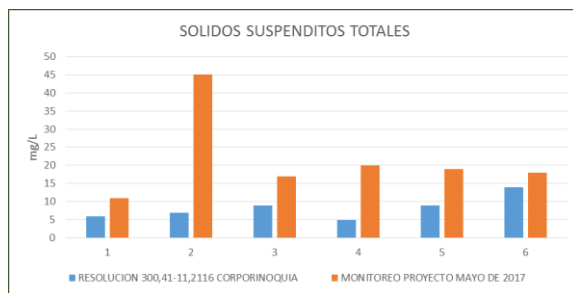
**Figura 3. pH**



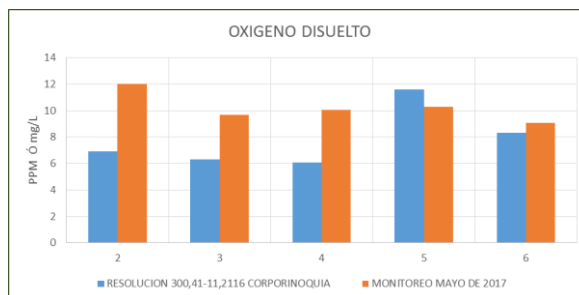
**Figura 4. Alcalinidad**



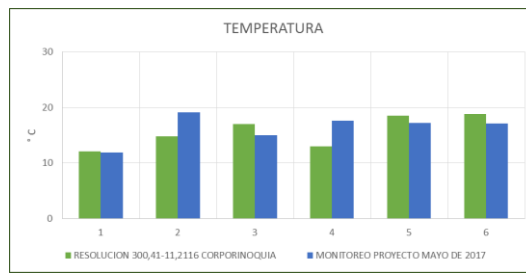
**Figura 5. Dureza**



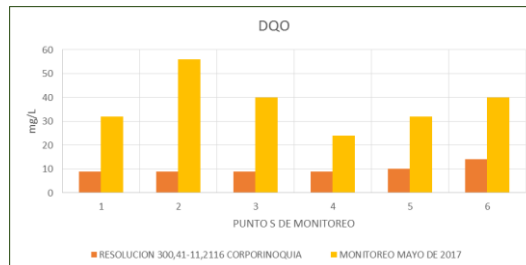
**Figura 6. Solidos Suspendidos Totales**



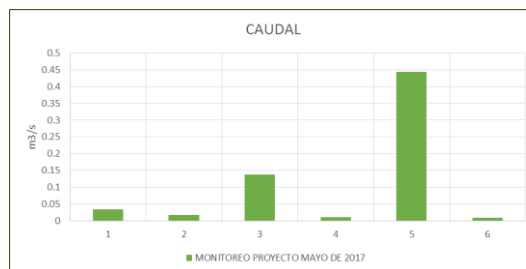
**Figura 7. Oxígeno Disuelto**



**Figura 8. Temperatura**



**Figura 9. DQO**



**Figura 10. Caudal**

#### 5.4 Microcuencas priorizadas en Cundinamarca

Se han identificado microcuencas del departamento de Cundinamarca en:

- Municipios con microcuencas de hasta 120 Has.
- Municipios que conforman cada Provincia de la CAR.
- Subcuencas del departamento de Cundinamarca.
- Áreas de cada municipio y de las subcuencas.
- Datos de población urbana y rural.
- Estudios de diagnóstico y/u ordenamiento y/o manejo de 2 subcuencas, y del recurso hídrico de un municipio.

Se identifican las subcuencas de la jurisdicción de Corpoguavio (departamento de Cundinamarca) según municipios y se documentan noticias de los medios de comunicación, con relación a los municipios que en Colombia y en particular en Cundinamarca, que han venido siendo afectados por riesgos naturales (de inundación, remoción en masa e incendios forestales) y escasez de agua.

#### 6. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares obtenidos en esta investigación muestran la importancia del estudio de las microcuencas del país, con el fin de crear conceptos que las posicionen, para que se creen mecanismos de evaluación, instrumentos de seguimiento, control y restauración del recurso hídrico.

La participación comunitaria es la base de la gestión en los territorios, ya que es en zona donde se evidencian realmente las problemáticas y las potencialidades; la apropiación social del conocimiento evidencia la reciprocidad de la investigación toda vez que el aprendizaje se trasmite de la comunidad a los investigadores y viceversa.

La calidad del agua teniendo en cuenta el primer monitoreo, en comparación con la resolución No. 300.41.11.2116 de diciembre de 2011, de corporinoquia y la Resolución 2115 de 2007 tiende a ser de buena calidad, ya que la mayoría de los parámetros están dentro de los rangos de aceptabilidad.

Los niveles de contaminación si se han incrementado al pasar del tiempo, teniendo en cuenta la resolución No. 300.41.11.2116 de diciembre de 2011, de corporinoquia, donde es importante entrar a revisar la reglamentación de usos del suelo para la zona e identificar de qué manera han cambiado las actividades económicas de la región.

El parámetro turbidez, es el único que sobrepasa el máximo permisible reglamentado en la Resolución 2115 de 2007, esto se debe a que las muestras fueron tomadas en época de lluvia, lo que hace que el caudal aumente por lo tanto los niveles de turbidez no cumplen con lo estipulado en la resolución.

## REFERENCIAS

- [1] IDEAM (2014). Estudio nacional del agua 2014. IDEAM.
- [2] Gonzalez, C. et al. (2000). EOT municipio de Ubaque. Universidad Nacional de Colombia.
- [3] Costa, C. et al. (2008). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: estudio nacional del agua, relaciones de demanda de agua y oferta hídrica. IDEAM
- [4] IDEAM (2014). Estudio nacional del agua 2014. IDEAM
- [5] Costa, C. et al. (2008). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: estudio nacional del agua, relaciones de demanda de agua y oferta hídrica. IDEAM.
- [6] Costa, C. et al. (2008). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: estudio nacional del agua, relaciones de demanda de agua y oferta hídrica. IDEAM
- [7] Prtesidencia de la República (2012). Decreto 1640.
- [8] IDEAM. (2014). Estudio nacional del agua. IDEAM.
- [9] MinAmbiente (2010). Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- [10] Gonzalez, C. et al. (2000). EOT municipio de Ubaque. Universidad Nacional de Colombia.
- [11] IDEAM (2015). Informe del estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2012, 2013 y 2014. Tomo I: Variabilidad Climática y Cambio Climático 2014.
- [12] [Alcaldía Municipal de Ubaque](#). Online [Nov 2017].
- [13] Gonzalez, C. et al. (2000). EOT municipio de Ubaque. Universidad Nacional de Colombia.
- [14] Vallejo G., Ferro, L. & Awazacko, M. (2016). Análisis de la problemática socioambiental de ubaque Cundinamarca, desde la gestión institucional y la participación. UGciencia 22(1), 127-147.
- [15] Corporinoquia (2011). Resolución No. 300.41.11.2116 de Diciembre de 2011.
- [16] ONU (2008). Apoyo a la rehabilitación productiva y el manejo sostenible de microcuencas en municipios de Ahuachapan. El Salvador, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- [17] Decreto 1729. (2002). Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones
- [18] SIAC (2006). Calidad de Agua. IDEAM.
- [19] Corporinoquia (2011). Resolución No. 300.41.11.2116 de Diciembre de 2011 "por medio de la cual se reglamente la corriente de uso público denominada la microcuenca del Río El Palmar.
- [20] MinAmbiente (2007). Resolución 2115. Bogotá.
- [21] [Secretaria de planeacion de Cundinamarca](#). Online [Nov 2017].

# Implementación de un modelamiento para la asignación adecuada de aulas mediante la gestión de servicios para profesores y alumnos de las universidades a nivel nacional

Sebastián Rivera M.<sup>1</sup>

Kevin A. Pérez R.<sup>2</sup>

Mario A. Giraldo L.<sup>3</sup>

Ángel E. Ramos C.<sup>4</sup>

Francia I. Caraballo M.<sup>5</sup>

Universidad Autónoma Latinoamericana  
Medellín – Antioquia

Este trabajo presenta una propuesta que incluye los requisitos necesarios para la utilización de un software que ayude al mejoramiento de la asignación de las aulas dentro de las universidades, ayudará a ahorrar tiempo ya que por medio de la gestión de servicios podremos dar una solución rápida y efectiva en la obtención automática de datos de entrada y un modelo de programación entero para resolver el problema de asignación de clases. Con la solución propuesta se puede distribuir mejor las aulas de cada asignatura y entregar a los profesores un aula que sea acorde a sus necesidades y capacidad de alumnos.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las universidades, se ofrecen programas académicos a la comunidad, estos contienen un número determinado de asignaturas ofertadas en diferentes horarios y ubicaciones específicas. Existen aplicaciones que permiten ingresar a correos institucionales, selección de asignaturas y horarios, inscripciones para cursos etc., pero algunas universidades no cuentan con una herramienta útil y eficaz, capaz de asignar las aulas de clase para los diferentes cursos que ofrece los programas académicos, por lo tanto, se generan inquietudes e indecisión a la hora de coordinar y gestionar las aulas respectivas para cada curso en los diferentes programas.

En algunas situaciones no concuerdan las aulas con el número de estudiantes en los cursos, pues cada aula de clase tiene diferentes capacidades y limitaciones, el número de estudiantes dependen de los programas académicos ofertados y de los cursos disponibles, puede darse que un curso con una población estudiantil alta en aulas de menor capacidad, lo mismo ocurre cuando la población estudiantil es baja y los grupos tienen aulas con mayor capacidad. También se presenta que los profesores, previo al momento dictar la clase, no tienen la ubicación del aula correspondientes, lo que genera pérdida de tiempo a la hora de iniciar la clase, se presenta doble asignación de aulas, es decir, que dos grupos pueden tener una misma aula y en ocasiones cuando hay eventos imprevistos, no se tiene un plan B para resolver a tiempo las asignaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, las universidades están teniendo este tipo de inconvenientes, su población estudiantil y sus docentes cada día se ven perjudicados por esto, lo que conlleva a que la planeación y el control que manejan las universidades con respecto a los calendarios académicos para estos cursos, se esté resolviendo en últimos instantes, sin tener claridad de algunas correspondencias pertinentes y el tiempo perdido tanto de los profesores como de los estudiantes.

## 2. SISTEMA DE INFORMACIÓN

Un sistema de información es cualquier equipo o sistema interconectado o subsistema de equipos de computación o telecomunicación que es usado en la adquisición, almacenamiento, manipulación, administración, movimiento, control, presentación, conmutación, intercambio, transmisión, o recepción de voz y/o datos, e incluye software, firmware y hardware. [7].

- *Gestión de servicios:* La gestión de servicios de TI (ITSM) suministra los servicios que necesita una empresa para cumplir sus objetivos de negocio. ITSM respalda la visión y los objetivos de negocio al optimizar los procesos de IT y comprender los resultados esperados por la empresa, permitiendo lograr dichos resultados mediante la provisión y mejora de los servicios que presta. Los servicios de ITSM fomentan y facilitan la evolución de una organización de TI transformándola en proveedor de servicios y no solo en proveedor de tecnología. [8].
- *Asignación de aulas:* determina qué secciones de cada clase o curso deben asignarse a qué profesores, en qué horarios y en qué aulas. Se define clase o curso como la asignatura o cuerpo de conocimientos que un grupo de estudiantes debe tomar. Las clases o cursos pueden tener una o más secciones. Las secciones de una clase se definen como los grupos mutuamente excluyentes de estudiantes que están matriculados en dicha clase [9].

---

<sup>1</sup> [sebastian.riveramo@unaula.edu.co](mailto:sebastian.riveramo@unaula.edu.co)

<sup>2</sup> [kevin.perezre@unaula.edu.co](mailto:kevin.perezre@unaula.edu.co)

<sup>3</sup> [mario.giraldolo@unaula.edu.co](mailto:mario.giraldolo@unaula.edu.co)

<sup>4</sup> [angel.ramosme@unaula.edu.co](mailto:angel.ramosme@unaula.edu.co)

<sup>5</sup> [isabel.caraballoma@unaula.edu.co](mailto:isabel.caraballoma@unaula.edu.co)



## 2.1 Aplicaciones para la asignación de aulas

Hoyos, Escobar, Hurtado, & Restrepo (2013) diseñaron un sistema por medio de SIG (Sistema de Información Geográfica) para la gestión y la asignación de aulas de la Universidad de Manizales. El sistema utiliza SIG que funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía. Hace un mapeo de toda la universidad por medio de los planos; este sistema permite visualizar, consultar y asignar salones dependiendo de características como la capacidad, si tiene equipos de cómputo, amplificación, tablero electrónico, entre otros. Además, el sistema brinda la posibilidad de seleccionar cualquier piso con el que se desee trabajar y realizar posteriormente la consulta y asignación de un espacio seleccionado. [1]. El autor en esta tesis utiliza la estructura de la universidad para hacer el mapeo por medio de SIG, con la ventaja de poder seleccionar cualquier espacio mostrado en el mapa y conocer los atributos disponibles. La desventaja de esta solución es que si se realiza un nuevo bloque en la universidad se tendrá que hacer otro mapeo con las nuevas modificaciones.

Fiallos, García, y Pérez (2008) realizan un diseño de sistema para la asignación automática de horario de clases. Este proyecto muestra cómo implementar un diseño de asignación automática de horario de clases con la selección de cada clase y su aula. Este modelo encuentra la asignación óptima de cada clase a su respectivo profesor y horario. En una segunda fase, se asignan las aulas a cada clase. También se consideran restricciones especiales que evitan que ciertas clases se asignen al mismo horario aún si tienen diferentes profesores. El diseño servirá de base para la implementación de un software que permitirá la planificación automática del horario de clases. El sistema propuesto intenta obtener la mayor información posible de manera automática con la intención de disminuir o eliminar los procedimientos iterativos de consulta a alumnos y al personal de Tecnologías de la Información. Los datos se toman del sistema de Registro de UNITEC y se agregan ciertas tablas y campos especiales para el funcionamiento del mismo. [2]

Por medio de este proyecto, se pueden tomar varias ideas que servirán como base para la implementación de un software que ayude en la problemática. Lo primero será tomar todos los alumnos matriculados dentro de la institución y crear una base de datos con la información. Segundo, tomar el pensum de la carrera del alumno por medio de un algoritmo que determine todas las clases que el alumno puede tomar de acuerdo a su pensum. Y tercero, el orden utilizado para la asignación de aulas, para que por medio de un algoritmo para que:

- A cada curso se le asigne un profesor, horario y aula.
- Para cada profesor se debe cumplir que éste no imparta más de una clase a una misma hora.
- Para cada hora, la cantidad total de cursos asignados no debe exceder la cantidad disponible de aulas para dicho tipo de cursos.
- Para cada profesor, la cantidad total de cursos asignados al mismo, no debe exceder la máxima cantidad de cursos que el profesor está dispuesto a impartir.
- Los cursos que corresponden a un mismo período académico según el diseño curricular, deben asignarse de forma tal que ningún estudiante tenga conflicto de horario.

Hernández, Miranda, y Rey (2008) presentan una aplicación para la programación de horarios de clases y asignación de salas para la Facultad de Ingeniería de la Universidad Diego Portales Mediante un Enfoque de Programación Entera. En el artículo se presenta un modelo de programación entera el cual decide simultáneamente los horarios de los cursos y la asignación de salas. Las variables utilizadas están asociadas a la definición del horario del curso para una semana por medio de un patrón horario. Una particularidad del modelo es que tanto las condiciones sobre capacidad y tipo de salas de clase, así como las combinaciones de bloques horarios para un curso, son manejadas implícitamente mediante las variables de decisión. El modelo propuesto entrega de manera rápida y eficiente los horarios y asignaciones de sala de clase satisfaciendo todos los requerimientos obligatorios y condiciones deseables para la Facultad en un tiempo menor a los 5 minutos. [3]

El proyecto es bastante viable por el tiempo de entrega de horarios y asignaciones de aulas de clase, hace una reducción de tiempo debido a que se integra Programación de horarios de clases para instituciones de educación superior o universidades (University Course Timetabling) lo que significa eliminar tope de horarios entre cursos del mismo semestre, respetar la disponibilidad de horarios de los profesores, respetar la capacidad de las salas de clase. La reducción es casi del 100% pasando de 1 mes para el procedimiento manual a menos de 5 minutos. No solo es viable por la eficacia sino también por la oportunidad de poder ingresar nuevos cursos, aunque ya haya en marcha. El proyecto integra programación entera lo que significa que utiliza el algoritmo de programación lineal que ayuda para la asignación. La ventaja más relevante es el uso de programación lineal entera, este modelo matemático tiene la aplicación para problemas de asignación lo que es de vital importancia dentro del proyecto, la desventaja del proyecto es que no tiene ningún tipo de ayuda didáctica para la selección de aulas lo cual se podría resolver con mapeo de la universidad.

Moreno y Bernal (2013) presentan un proyecto de información en línea sobre las aulas por medio de código de barras (QR). El objetivo de este proyecto es brindar una solución a la asignación de aulas desde el punto de vista de la ingeniería de sistemas, utilizando tecnologías de fácil acceso para los integrantes de la comunidad educativa; como lo

son páginas web y códigos de barras con el formato QR. El resultado final del proyecto es proveer una herramienta, la cual mediante la utilización de una página web y los códigos de barras QR asignado a cada aula dentro de la institución, podrán brindar información en línea sobre las diferentes cátedras y ubicación que se muestra por medio de un mapeo completo de la universidad la cual muestra las aulas que conforman el campus universitario. Para el uso de los códigos QR se requiere que los estudiantes tengan Smartphone para realizar la lectura de los QR. [4]

Dentro de las ideas planteadas en el proyecto es importante resaltar la idea de realizar una página Web la cual funcionara teniendo información completa de aulas, horarios, profesores, materias, entre otros. Y así tener una plataforma en línea de fácil acceso para la programación a tiempo de las aulas de clase. La gran desventaja encontrada en el proyecto es que no todos los estudiantes van a contar con un Smartphone lo cual es el requisito principal para poder usar la aplicación.

Gonzales (2011) presenta una herramienta de software para asignación de aulas y espacios físicos. Ante la necesidad de las escuelas por obtener un sistema de información que brinde soporte en la programación, asignación y administración de grupos semestralmente para configurar los horarios y aulas de cada grupo dependiendo de los recursos disponibles, ha surgido también la necesidad de un sistema con el que se pueda gestionar la asignación automática de aulas a dichos grupos, esta tesis está basada en la investigación de la administración óptima de recursos por medio de artefactos automáticos basados en restricciones, como resultado del desarrollo de la investigación, se ha generado una herramienta colaborativa basada en java 5, que permite a los directivos de la universidad industrial de Santander administrar de manera automática los recursos como físicos como aulas, laboratorios y auditorios a nivel de escuela, y a nivel de sede. [5]

El desarrollo de esta herramienta se encuentra encapsulado en el estándar de programación de la división de servicios de información de la universidad industrial de Santander comprendiendo las tecnologías de programación orientada a objetos, la estructura de modelo, vista, controlador y la metodología de desarrollo de prototipos. Con base en este proyecto, nos gustaría implementar:

- Métodos heurísticos para resolver inteligentemente problema real usando el conocimiento disponible y por el alto grado de confianza que se tiene de estos métodos.
- La interfaz gráfica tiene mucha relación con lo que vamos a implementar y tiene muy buen diseño.
- Usar prototipos funcionales para el mejoramiento de factores como funcionalidad, seguridad y diseño.

Muñoz y Hernández (2010) plantea una propuesta de modelo de gestión para la gerencia de gestión documental y centro de servicios compartidos del grupo Bancolombia en Medellín. En este trabajo se describe la importancia y la aplicación del modelo óptimo para la gerencia de gestión documental del grupo Bancolombia en Medellín, teniendo bases en varias teorías como Gestión del conocimiento, descripción y retroalimentación de modelos que ya han sido implementados en diferentes organizaciones. [6]

Primero se tuvo que conocer la problemática que había en el campo que se iba a implementar y la empresa que lo experimentaba, como lo es Bancolombia, esta organización es denominada como líder en servicios bancarios en Colombia, y cada día debe mantenerse al tanto de los cambios que se dan y que la misma sociedad exige. La herramienta que se propuso para poder hacer más fácil dicha adaptación fue un modelo de gestión del conocimiento, que conociendo los objetivos (Tanto generales como específicos), sus visiones y misiones, pueda aportar significativamente, para el caso de recuperación, documentación y manejo de la información que sea otra mejora para los procesos de la organización. Para concluir con este tema, al haber consultado con diferentes autores sobre el tema y haber descubierto varias causas que trajo la falta de un modelo de Gestión del conocimiento en la gerencia de Gestión Documental, se pudieron deducir los siguientes beneficios:

- Al identificar los procesos en el área de implementación teniendo en cuenta la experiencia de los que laboran en este campo día a día, se pueden optimizar las prácticas y oportunidades cuando se tenga que resolver una situación frente a un cliente.
- También se espera que obtenga la capacidad de generar nuevo conocimiento por medio de la innovación y mejoramiento de los procesos, ya que con esto se tendrá un mejoramiento continuo y a su vez una reducción de errores en la prestación de servicios.

### **3. DESARROLLO**

En el desarrollo de este proyecto se utilizó como medio de recolección de información la entrevista a diversas universidades con el objetivo de conocer que programas o metodologías utilizan en el proceso de asignación de aulas y que variables tienen en cuenta en la ejecución de este proceso. Se tomó una muestra representativa de 3 universidades locales, Universidad Autónoma Latinoamericana – Unaula, Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Técnico Industrial Pascual Bravo. Nos dirigimos a 3 universidades. Inicialmente se buscó contacto directo con el área de planeación en estas, debido a que esa es el área encargada de este proceso. Cada entrevista estaba enfocada a conocer el proceso de asignación, conocer los actores directos en todo el proceso, conocer los parámetros y criterios que se utilizan para asignar el aula pertinente o la que mejor se adecue a la necesidad. Cada universidad nos otorgó información puntual y de suma importancia para la investigación.

### 3.1 Entrevistas

#### 1. Universidad Autónoma Latinoamericana

*¿Utilizan algún programa para el proceso de asignación de aulas en la universidad?* La universidad cuenta con un sistema integrado llamado SAI, el cual es una plataforma web, entre sus componentes cuenta con dos apartados SIRIA, herramienta que utilizan para la gestión de aulas y recursos en toda la universidad y SIPA, herramienta que utilizan para la programación académica semestral.

*¿Cuál es el proceso de asignación de aulas utilizado por la universidad?* El proceso de asignación de aulas utilizado por la universidad es ejecutado en tiempo de matrículas, en este se tienen en cuenta variables como la cantidad de estudiantes por asignatura y el tipo de aula que necesita la asignatura. Principalmente se tiene un promedio de 40 estudiantes por asignatura realizando un chequeo continuo de las matrículas para obtener la cantidad exacta de estudiantes. Además de esto se cuenta con un histórico de las asignaciones, de modo que esto les permite en ciertos casos mantener la asignación anterior para el semestre en curso, esta asignación puede variar si cambian las necesidades de la asignatura y/o la cantidad de estudiantes disponibles para el semestre en curso. Para la asignación se cuenta con unas aulas disponibles y otras reservadas para posibles imprevistos en el transcurso del semestre, la asignación se hace en base a las aulas disponibles.

Para la asignación ya se tienen definidos la cantidad de asignaturas y cursos a dar, esta información en proporcionada por las facultades luego de realizar la programación académica en la herramienta SIPA, además ya cuentan con una disponibilidad horaria de las aulas, de modo que la asignación se hace en base a esta información. Luego de completar la asignación se realiza un informe, el cual es entregado al personal encargado de entregar las llaves de las aulas a los docentes, la regularidad de este informe puede variar dado casos de cambios de aulas o de nuevas asignaciones debido a la disponibilidad de nuevos cursos (diplomados, seminarios, conferencias, etc.) que ofrezca la universidad. Para el cambio de aula, los docentes realizan una solicitud a la facultad pertinente con las especificaciones de la nueva aula que necesitan, la facultad envía la solicitud al área de Planeación donde se realiza un análisis del cambio solicitado y luego se efectúa este de la mejor manera posible en tiempo real para todos los usuarios involucrados.

#### 2. Universidad Nacional de Colombia

*¿Utilizan algún programa para el proceso de asignación de aulas en la universidad?* La universidad cuenta con la aplicación UNIVERSITOS 21 utilizada para la programación y asignación de aulas. Este aplicativo les permite realizar una tipificación de todas las aulas de la universidad, además muestra la disponibilidad del aula.

*¿Cuál es el proceso de asignación de aulas utilizado por la universidad?* El proceso de esta universidad se basa en la programación académica, esta universidad cuenta con 28 departamentos y cada uno se encarga de la planeación de los cursos a dictar, en dicha planeación realizan una estimación de la posible demanda con la que contara el curso. Cada departamento cuenta con una cantidad de aulas asignadas, de modo que puedan realizar una posible disponibilidad de las aulas según los horarios de las asignaturas. Esas aulas asignadas no son fijas, solo son utilizadas para cuadrar los horarios de disponibilidad. La asignación realizada por los departamentos es enviada al área de planeación donde se corrobora la información y se completa el proceso al asignar las aulas según las necesidades de la asignatura. Además de las aulas disponibles cuentan con aulas restringidas o de uso exclusivo.

En cuyo caso de que existan inconformidades con el aula asignada existe la gestión de solicitudes a programación académica (GSPA) la cual es diligenciada por los directores de departamento, en la cual se expresa la inconformidad y/o los requisitos del cambio. Ya finalizada la asignación, se le hace entrega de un informe a los conserjes para que estos puedan entregar las llaves a los docentes. Para realizar la reserva de un aula cuentan con un módulo, en el cual se debe plasmar el tipo de aula que se necesita y la finalidad de la reserva, esta solicitud es sometida a un análisis y se realiza la asignación en tiempo real en el aplicativo.

#### 3. Instituto Técnico Industrial Pascual Bravo

*¿Cómo realizan el proceso de reservas de aulas?* Se debe enviar un correo al encargado de administrar las aulas en la institución, este realiza una búsqueda de las aulas según las necesidades plasmadas en la solicitud. Luego de encontrar las aulas y verificar la disponibilidad se elige la que mejor se acomode a la solicitud y luego se le notifica al docente.

*¿Qué criterios se tienen en la asignación de aulas?* Se reúne toda la información de las aulas, es decir, cuentan con las características de las aulas, luego esta información es añadida a la plataforma en la cual se les asigna una asignatura acorde a las necesidades. En caso de inconformidad con el aula, el docente se debe comunicar con el jefe de departamento, quien se encarga de realizar la solicitud pertinente para la pronta solución.

### 3.2 Variables a considerar de acuerdo con los antecedentes

- *Información geográfica de las aulas* [1], variable utilizada para relacionar el aula en su ubicación geográfica del bloque en el que se encuentre, permitiendo una vista digital además de contener toda la información pertinente del aula.

- *Horario* [2], la variable es primordial para poder realizar una asignación adecuada, al tener en cuenta el horario (del docente y estudiante, e indirectamente el de la asignatura) se podrán evitar incongruencias en la asignación final, tales como asignaturas en aula fuera del tiempo de disponibilidad, aulas con múltiples asignaturas al mismo tiempo, etc.
- *Identificación de aulas por códigos de barras QR* [4]), variable utilizada como otro medio para poder identificar el aula, su ubicación y sus características en tiempo real, a través de los dispositivos móviles.
- *Gestión del conocimiento* [6], la retroalimentación de los procesos anteriores y actualmente utilizados para la mejora, permitiendo una optimización de recursos.

#### 4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Como propuesta de solución se recomiendan tener una integración completa de la programación académica y la gestión de aulas, de modo que se pueda realizar un enlace directo en estas dos fases del proceso de asignación. Además, recomendamos unos criterios claves en el proceso. Criterios claves para una buena asignación de aulas

- Tipificación de aulas: realizar una clasificación completa y detallada de cada aula disponible, capacidad disponible, cantidad de alumnos disponibles, tipo de aula (laboratorio (de arte, física, química, electrónica, etc.), sala de cómputo, auditorios, etc.), ayudas tecnológicas integradas en el aula (proyector, Televisor, sistema de audio), aire acondicionado, etc.
- Programación académica: Al hablar de programación académica nos referimos a asignaturas disponibles, cantidad de alumnos por asignatura, requisitos de la asignatura, etc. Contar con la programación académica final o por lo menos la programación que más se asemeje a la realidad. Al contar con una programación completa se pueden realizar mucho mejor el análisis de las aulas necesarias para cumplir con esta.
  - Clasificación de asignaturas,
  - Asignaturas disponibles,
  - Horarios disponibles,
  - Cantidad de estudiantes (cantidad real o lo más cercano posible a la realidad),
  - Naturaleza de la asignatura (pregrado, posgrado, diplomado, etc.).
- Necesidades de la asignatura: contar con información detallada y puntual de los elementos requeridos para el buen desarrollo de la asignatura, es decir, la asignatura necesita computadores, se necesita que el aula cuente con aire acondicionado, se necesita de un aula con mesas, etc.
- En el momento de asignar las aulas tomar como prioridad cantidad de estudiantes en relación con el tipo de aula que se necesite para la asignatura, esto con el objetivo de no ocupar un aula que principalmente no soporte la cantidad de estudiantes y que no cuente con las características necesarias para el buen desarrollo de la asignatura.

Vista de administrativos de planeación.

- La vista para la(s) persona(s) encargadas tendrá:
  - Logeo
  - Botón para agregar, editar, eliminar Asignatura.
  - Botón para agregar, editar, eliminar Aula
  - Lista de chequeo con el tipo de aula (Sala de cómputo, audiovisual, auditorio, etc.)
  - Lista de chequeo con el tipo de herramientas requeridas para el aula (TV, Video-Beam, PC, etc.).
  - Capacidad de aula

Para el aula los campos serán:

- Nombre de aula
- Tipo de aula
- Capacidad de aula
- Dotación del aula
- Asignatura que se da en esa aula
- Horario de uso del aula (LW, 18-20)
- Ubicación geográfica del aula (Medellín, Colombia)
- Sede del aula
- Ubicación del aula en la sede
- Fecha inicio y fin de clases
- Grupos que estarán en el aula (500, 001, etc.)
- Para la asignatura los campos serán:
  - Nombre de la asignatura
  - Código de asignatura
  - Número de créditos
  - Horas

- Días
- Grupo
- Nombre docente
- Fecha de inicio y fin de clases

A continuación, se muestra las vistas del sistema y cada uno de los roles asignados (Figura 1).



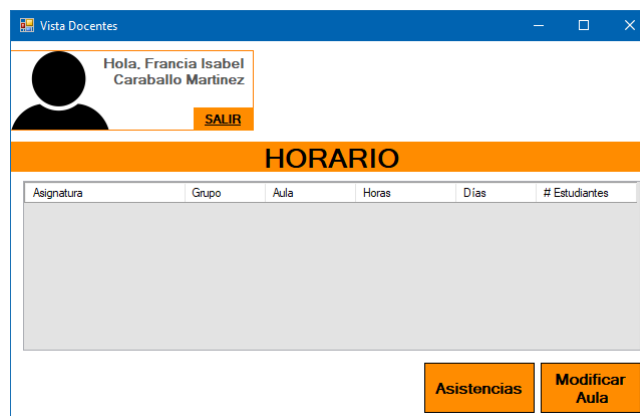
**Figura 1.** Menú principal del sistema

*Vista Estudiantes.* Por medio de un usuario y una contraseña – el usuario será el asignado inicialmente por la universidad y que se utilizan para ingresar a las diferentes plataformas – los estudiantes ingresaran al sistema de información con el fin de obtener información de aulas de clase, registro de asignaturas de acuerdo al semestre. Una vez se valide el usuario, El sistema mostrará un horario con las respectivas asignaturas registradas en el semestre, además el estudiante tendrá la posibilidad de seleccionar una asignatura en específica y así ver la información a detalle de la asignatura, es decir, información del aula, número de estudiantes, nombre del docente y horarios (Figura 2).



**Figura 2.** Vista del sistema para estudiantes

*Vista Docentes.* Al igual que los estudiantes, los docentes tendrán acceso al sistema por medio de un usuario y una contraseña – el usuario será el asignado inicialmente por la universidad y que se utilizan para ingresar a las diferentes plataformas - una vez ingresado al sistema, cada docente podrá seleccionar los cursos que actualmente dirige en la universidad y de acuerdo a la selección del curso, el sistema le mostrará un cronograma con la asignación de aula para dicha clase, el número de estudiantes que se tendrá en el curso, los días de la semana en que se dictara el curso, los respectivos horarios y demás información relacionada con las novedades que se presentan (Figura 3).



**Figura 3.** Vista del Docentes, asignación de aula

El docente contará con la opción Modificar Aula en el sistema para solicitar el cambio de la misma, allí tendrá que especificar el aula de la asignatura que desea cambiar y esta mostrará las horas de disponibles de la asignatura, los

días en que esta se dicta y la cantidad de estudiantes en el curso, además deberá especificar el motivo por el cual solicita el cambio. De acuerdo a la información de entrada, el sistema verificara las asignaciones de las demás aulas y la posibilidad de acceder a la solicitud de cambio de aula (Figura 4).

Figura 4. Vista del Docentes, solicitud de cambio de aula

*Personal encargado de las llaves* (Conserjes). Mediante el logueo en el sistema con un usuario asignado al personal tendrá acceso al sistema, el cual contara con la información actualizada y detallada sobre todas las aulas disponibles en el edificio, la ubicación de cada aula, el horario de las aulas asignadas a los docentes, los datos del docente (ID, nombre, correo) al cual ha sido asignada y el estado de disponibilidad actual de la misma.

Al seleccionar un aula, se deberá mostrar el cumulo máximo para estudiantes, las horas de disponibilidad que posea dependiendo de los docentes que vayan a hacer uso de esta y el estado en el que se encuentre para verificar su disponibilidad actual.

Una vez se le conceda las llaves al docente, el funcionario encargado de distribuir las llaves del aula deberá actualizar el estado de las mismas que estén ocupadas dependiendo las horas del docente, de igual manera deberá modificar el estado cuando se le regresen las llaves. (Todo esto es si no se tiene asignado un uso para esa aula previamente) (Figura 5).

Figura 5. Vista del personal encargado de las llaves

## 5. CONCLUSIONES

Cada una de las universidades entrevistadas dispone un sistema para el proceso de asignación de aulas, tanto la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA LATINOAMERICANA UNAULA Y EL INSTITUTO TÉCNICO INDUSTRIAL PASCUAL BRAVO cuentan con el Sistema Académico Integrado - SAI, entre sus componentes cuenta con 2 módulos utilizados por estas universidades:

- SIRIA – Gestión de aulas y recursos: este módulo administra las aulas, laboratorios, salas de micros, etc. de la universidad. Sus principales funciones son:
  - Registro y caracterización de aulas.
  - Reservas de aula vía Web.
  - Asignación en línea de aulas.
  - Búsqueda de aulas.
  - Informe y consultas sobre ocupación de aulas.

*Variables SIRIA:* cantidad de estudiantes, cantidad de aulas disponibles, tipo de aula, ubicación del aula, ayudas tecnológicas integradas en el aula (computadores, proyector, televisor, aire acondicionado, etc.), naturaleza de la asignatura, naturaleza del programa (posgrados, pregrados, especializaciones, seminarios, licenciaturas, etc.).

- SIPA – Programación académica: Realiza la programación académica de los programas disponibles para el próximo semestre. Sus principales funciones son:

- Predicciones.
- Restricciones.
- Programación académica.
- Utilidades.
- Consultas e informes.
- Indicadores.

*Variables SIPA:* asignaturas disponibles, docentes disponibles, horarios disponibles, cantidad de estudiantes, naturaleza del programa (posgrados, pregrados, especializaciones, seminarios, licenciaturas, etc.). Mientras que la universidad nacional de Colombia dispone del sistema Universitos 21 – administración de y programación de aulas. Este sistema administra totalmente la asignación y reserva de las aulas, en esta se enlaza cada asignatura a un aula y por medio de este se realizan y manejan las reservas de las aulas. Además, cuenta con el módulo Gestión De Solicitudes A Programación Académica – GSPA para las solicitudes de inconformidad con las aulas asignadas, únicamente utilizada por el director de cada departamento.

*Variables Universitos 21:* asignaturas disponibles, cantidad de estudiantes, aulas disponibles, horarios, tipo de actividad a realizar en el aula, tipo de aula. Ambos sistemas tienen como público objetivo los entes administrativos del área de planeación, solo estos directivos pueden realizar las asignaciones y cambios en los sistemas, lo que es desfavorable para el personal de llaves, quienes solo reciben una planilla, cada vez que termina el proceso, con la información del aula, el horario y el docente a quien ha sido asignada.

*Roles:* ambos sistemas manejan dos roles, administrativo, quienes se encargan de la gestión (asignaciones y cambios) y el usuario final, quien solamente puede ver la asignación que se realizó. Al ser sistemas con distintos desarrollos y distintos objetivos (universitos 21 es un software destinado netamente a la Programación académica y la Gestión de aulas mientras que SAI está destinado a la Gestión e Integración Académica en general.) cuentan con elementos comunes como lo es la Programación Académica y la Gestión de Aulas, ambos se manejan en tiempo real permitiendo que sus usuarios se enteren de inmediato de los cambios realizados.

Como posible trabajo futuro se puede optar por el desarrollo de un software integrado, este software integraría todo el proceso de programación académica y gestión de aulas, además tendrá una vista para:

- Administrativos de planeación,
- Administrativos de los departamentos académicos,
- Estudiantes y Docentes, y
- Personal encargado de las llaves (Conserjes).

## REFERENCIAS

- [1] Hoyos, C. et al. (2013). SIG para la gestión de aula de la Universidad de Manizales. Trabajo de grado. Universidad de Manizales.
- [2] Fiallos, J., García, J. & Pérez, J. (2008). Diseño de un sistema de asignación automática de horario de clases: Caso UNITEC. En: Sixth International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology.
- [3] Hernández, R., Miranda, J. & Rey, P. A. (2008). Programación de Horarios de Clases y Asignación de Salas para la Facultad de Ingeniería de la Universidad Diego Portales Mediante un Enfoque de Programación Entera. Revista Ingeniería de Sistemas 23, 121-141.
- [4] Moreno, L. & Bernal, J. (2013). Información en línea sobre las aulas – Quick Response. Trabajo de grado. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- [5] Moreno, J. (2011). Herramienta de software para la asignación de las aulas y espacios físicos requeridos para la programación de asignaturas y grupos ofrecidos por cada una de las escuelas semestralmente en la Universidad Industrial de Santander. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.
- [6] Muñoz, H. & Hernández, C. (2010). Propuesta del modelo de gestión del conocimiento para la gerencia de gestión documental y centro de servicios compartidos del Grupo Bancolombia en Medellín. Trabajo de grado. Universidad de Antioquia.
- [7] Murdick, R. (1989). Sistemas de información. Prentice Hall.
- [8] Figuerola, N. (2012). [ITIL versión 3 ¿Por dónde empezar?](#) Online [Ene 2018].
- [9] Fiallos, G. (2008). Diseño de un sistema de asignación automática de horario de clases: Caso UNITEC. En: Sixth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology.



# Caracterización de las dificultades en el aprendizaje del Álgebra y técnicas de gamificación para el Diseño de un Sistema Tutorial Inteligente

David Montoya P.<sup>1</sup>

Sandra P. Mateus S.<sup>2</sup>

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid  
Medellín – Antioquia

Este capítulo plantea el desarrollo de un Sistema Tutorial Inteligente (STI), para acompañar el proceso de aprendizaje del Álgebra usando técnicas de gamificación. La metodología usada para el desarrollo del trabajo, fue la siguiente: Se realizó una caracterización de las distintas dificultades en el aprendizaje del Álgebra; luego, se exploraron distintas metodologías para gamificar un sistema; a partir de ésta, se diseñaron los módulos del Sistema Tutorial Inteligente para la construcción de un prototipo de STI. El prototipo logra estar gamificado, manteniendo un ambiente divertido y motivante, además, el sistema responde a las necesidades del estudiante, respecto al aprendizaje del Álgebra.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un Sistema Tutorial Inteligente (STI) es un sistema de computación dirigido al aprendizaje, en donde por cada estudiante, se realizan funciones de tutoría, tales como: presentar información a conocer, asignar tareas para provocar cambios cognitivos o responder preguntas realizadas por los mismos estudiantes [1]. La principal función del STI, es entonces, proporcionar instrucciones inmediatas y personalizadas o retroalimentando a los estudiantes, usualmente, sin la participación de un profesor humano, mediante un modelo cognitivo creado por Inteligencia Artificial (IA) [2]. La arquitectura de estos sistemas, está compuesto usualmente por cuatro Módulos: de dominio, de estudiante, de interfaz y de tutor [3].

Adicionalmente, numerosos estudios centrados en el desarrollo de los STI orientados a las matemáticas, han descrito el rendimiento positivo de los estudiantes en esta área [3, 4, 5]. En el campo del Álgebra, constantemente se evidencian dificultades en el aprendizaje [6] y en este sentido, se diseñó un STI, donde se evidencia la mejoría en el rendimiento académico, aunque el nivel de uso del sistema, no fue el recomendado, dado lo poco entretenido [7]. Es por lo anterior, que se propone el desarrollo de un Sistema Tutorial Inteligente, que incite al estudiante a hacer uso de éste, mediante la implementación de técnicas de gamificación, es decir, procesos destinados a mejorar los sistemas para incrementar la diversión y la motivación, haciendo uso de elementos característicos en los juegos [8], con el fin de brindar un asesoramiento personalizado en distintos tópicos del Álgebra.

Este capítulo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2, se define que es un Sistema Tutorial Inteligente, en la sección 3, se caracterizaron las dificultades en el aprendizaje del Álgebra; en la sección 4, se caracterizan las distintas metodologías para gamificar un sistema; en la sección 5, se desarrolla la metodología elegida; y finalmente, se exponen las Conclusiones.

## 2. LOS SISTEMAS TUTORIALES INTELIGENTES

Ma *et al.* [9], exponen que un Sistema Tutorial Inteligente es un sistema de computación dirigido al aprendizaje, en el cual, por cada estudiante, se realizan funciones de tutoría. Del mismo modo, Rosado, Sánchez y García [10], lo definen como un sistema que hace uso de Inteligencia Artificial para modelar el conocimiento de instructores y estudiante. González *et al.* [3], proponen la siguiente arquitectura para un STI:

- Módulo de dominio: Contiene el conocimiento experto en áreas relacionadas a evaluar procesos, y metodologías de enseñanza y aprendizaje. En este módulo, se almacena la base del razonamiento-conocimiento y los mecanismos de resolución de problemas.
- Módulo de interfaz: Es aquí, donde se encuentra la representación de los mecanismos de contenido educativo (imágenes, sonidos, animaciones, etc.).
- Módulo estudiante: Contiene el cuerpo del conocimiento que caracteriza al usuario. Este módulo permite obtener la evolución en el comportamiento del estudiante y representar su estado cognitivo (lo que sabe, y lo que no sabe) - en inglés - *what you know and what you do not know*.
- Módulo tutor: Representa la información para decidir qué actividades son presentadas al estudiante, de acuerdo con los objetivos de aprendizaje del módulo de dominio. Es el responsable de generar los procesos para cada sesión.

Adicionalmente, Zatarain *et al.* [4], proponen un quinto módulo de Gamificación, el cual es el encargado de motivar a los usuarios, incentivar al uso del sistema y promover el aprendizaje, calculando puntos extras y bonos. En este sentido, Fancsali *et al.* [7], implementaron un STI orientado al aprendizaje del Álgebra, para analizar su impacto en un

<sup>1</sup> david\_montoya82131@elpoli.edu.co

<sup>2</sup> spmateus@elpoli.edu.co

gran distrito escolar del sureste de los Estados Unidos. En cuanto al rendimiento de los estudiantes, este se vio impulsado por haber hecho uso del sistema académico, aun así, los autores indican que pudo ser mayor el aporte si se hubiera hecho más uso del sistema, es decir, una hora y media por semana, 50 horas al año. Se registraron instituciones donde el nivel de uso fue hasta 5 horas al año por alumno. Exponen que, para lograr un constante uso del sistema, es necesario un rol activo de los docentes en el proceso, debido a que el STI no busca sustituir por completo el aporte de los maestros en el aula de clase, sino en ser un complemento durante el aprendizaje. Sin embargo, el STI implementado, no contaba de ningún módulo de gamificación, provocando el bajo uso del sistema.

Nour y Samy [5], diseñaron un STI donde el módulo de dominio contiene temas como: Álgebra, los números reales, los exponentes enteros, las raíces de números reales, los exponentes racionales, los polinomios radicales, la adición y sustracción y la factorización de polinomios de segundo grado. Así mismo, el módulo de estudiante, contiene información básica del alumno y la necesidad de crear un perfil nuevo para cada uno. En cuanto al módulo de tutor, los temas están divididos en niveles, donde para avanzar al siguiente, el alumno debe completar el 75% o más del contenido. Finalmente, el módulo de interfaz, soporta dos clases de usuario: estudiantes y docentes. Los docentes pueden agregar o modificar contenidos, ejercicios y respuestas, además de otras funciones respecto al diseño de la interfaz. Y los estudiantes, pueden estudiar contenidos, resolver ejercicios y visualizar ejemplos. No obstante, el STI diseñado, no posee un módulo de gamificación o similares, además de no estar basado en las dificultades de aprendizaje del Álgebra.

Por otro lado, González *et al* [3], diseñaron un STI llamado EMATICS, orientado especialmente a tabletas y teléfonos móviles, para la enseñanza de operaciones matemáticas básicas a niños. El software está orientado a dos perfiles de usuario: a niños que buscan un software amigable y divertido y a especialistas que necesitan crear actividades educativas divertidas de manera rápida, debido a esto, incluyen tres nuevos módulos: el módulo de autoría, es aquí, donde el especialista puede crear nuevo contenido; el módulo de administración, componente encargado de manipular los grupos de estudiantes y sus particularidades; y el módulo de visualización, elemento capaz de descubrir patrones en ciertas dificultades de aprendizaje, gracias a la minería de datos. EMATICS demostró mejorar el proceso de aprendizaje y alcanzar los logros de los estudiantes, aunque resaltando el inapropiado uso del sistema, debido al aburrimiento, falta de interés, motivación y monotonía. Lo anterior producido, por no manejar una metodología para gamificar o al menos haber analizado previamente las necesidades de los niños, en cuanto a su motivación.

Así mismo, Faghihi *et al* [11], desarrollaron un STI destinado al aprendizaje de los casos de factorización, con componentes de gamificación como sonidos, música, medallas y puntajes, además, lo implementaron en la Universidad Estatal de Sul Ross. De acuerdo a sus resultados, los estudiantes que hicieron uso del sistema, recordaron en mayor medida la fórmula cuadrática y presentaron un rendimiento mayor frente al grupo que no hizo uso del software. Aun así, no se expone el uso de metodologías de gamificación o el proceso por el cual, se gamificaron las actividades planteadas. Tampoco se menciona las condiciones que debe cumplir el estudiante para pasar al siguiente nivel.

De manera similar, Zatarain *et al* [4], crean un STI orientado a los tópicos de matemáticas, definidos en el plan vigente de México para el primer grado de secundaria. Para poder entregar un ejercicio al estudiante, el sistema tiene en cuenta múltiples factores: el tiempo, los intentos, los aciertos y errores, el nivel, los puntos y las ayudas. Adicionalmente, gracias a la herramienta PREMOC que integra el STI, se puede detectar la emoción del estudiante y poder tomar decisiones más acertadas. Del mismo modo, las acciones de gamificación como puntuación, estrellas y logros, son elegidos dependiendo de los factores ya mencionados para escoger el ejercicio. Aunque el sistema demostró aumentar el rendimiento y la atención de los estudiantes, no se tratan tópicos referentes al Álgebra.

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS DIFICULTADES EN EL APRENDIZAJE DEL ÁLGEBRA

Esquinas [12], define el Álgebra como método generalizador de la aritmética y método para la resolución de ecuaciones, como estructura matemática. Además, indica que aproximadamente desde los 12 años, se profundiza más en la aritmética, por lo cual, puede dar el primer paso al Álgebra, el cual es, una ecuación, donde existe un problema de perspectiva de incluir símbolos en lugar de números, resaltando la necesidad de interiorizar este cambio (ver Figura 1, los espacios sombreados, son los que el estudiante debe completar); sin embargo, no hay diversidad ni dinamismo en la mayoría de las actividades propuestas.

Enunciado	Operación Aritmética	Estructura Operacional
Tengo 2 manzanas y me dan 7 más.	2+7	$\square + \square$
El cine cuesta 6€ y voy tres veces esta semana.	3.6	$\square . \square$
Tengo 18 caramelos y los reparto entre 6.		
	9.5	
		$\square + \square - \square$

Figura 1. Propuesta de actividad para interiorizar la simbología [12]

Badia, Garganté, Antoni, et al. [13], explican que el pensamiento algebraico es una competencia que permite expresar simbólicamente, procesos de carácter general y su manipulación, con dificultades en su aprendizaje, manifestadas en

tres ámbitos: la generalización de operaciones aritméticas y sus propiedades, es decir, no determinar el símbolo como representante de diferentes valores; la búsqueda de patrones, esto es, la dificultad de transición de lo particular a lo general; y la simbolización y modelización, dicho de otro modo, la dificultad de utilizar letras para representar variables en el contexto de la resolución del enunciado. Aunque el artículo identifica las dificultades de los estudiantes, no propone ejercicios para solucionarlos. Sosa, Flores-Medrano y Carrillo [14], consideran que el profesor, en relación con el aprendizaje de las matemáticas, debe poseer un conocimiento que le permita anticiparse a los modos de pensamiento del estudiante y la capacidad para guiarlo; no obstante, los autores no sugieren actividades para conocer el perfil del alumno, con la intención de calificar su desempeño.

Jupri y Drijvers [15], clasifican las dificultades de los estudiantes en el aprendizaje del Álgebra, en 5 categorías: 1. Las operaciones y sus propiedades; 2. Distinguir un símbolo como representante de diferentes números; 3. Obtener una expresión en lugar de un número como respuesta y tener un límite de simplificar; 4. El símbolo igual, el cual se toma como una invitación a calcular cuando es signo de equivalencia; y 5. La Matematización, representación de la realidad en matemáticas y viceversa. Los autores exponen múltiples actividades, aunque estas están diseñadas para demostrar que los estudiantes poseen dificultades, más no para solucionarlas. En la Tabla 1, se puede visualizar la relación de los autores mencionados anteriormente y su inclinación por ciertas dificultades en el aprendizaje del Álgebra.

**Tabla 1.** Caracterización de las dificultades en el aprendizaje del álgebra

<b>Autores Vs Dificultades</b>	[9]	[10]	[12]
Aritmética		✓	✓
Propiedades		✓	✓
Símbolo Igual			✓
Generalización	✓	✓	✓
Ecuaciones			✓
Patrones	✓	✓	
Modelización	✓		
Matematización			✓
Simplificación			✓
Álgebra		✓	

Dado que el concepto de Matematización, involucra convertir situaciones de la vida real y viceversa, representa también una abstracción elevada para implementar en el desarrollo de este proyecto, por lo que se sale del alcance. Por otro lado, el símbolo igual al ser una dificultad con poca variedad en sus actividades y ser un tema relativamente pequeño junto a los demás, se unificó con el concepto de Ecuaciones, debido a que, con éste se tiene mayor relación. De este modo, se distinguieron las siguientes dificultades como los tópicos del Álgebra a trabajar:

- Aritmética: La capacidad para solucionar expresiones matemáticas, respetando el orden de las operaciones.
- Propiedades: Se refiere a poder aplicar debidamente, las propiedades de la Aritmética.
- Generalización: Habilidad para determinar un símbolo como representante de diferentes valores.
- Ecuaciones: Este tópico apunta a tener la habilidad para distinguir el símbolo igual como equivalencia y una expresión como resultado.
- Patrones: Es la transición de lo particular a lo general.
- Modelización: La capacidad para reconocer símbolos como representantes de una variable en la vida real.
- Simplificación: A partir de una expresión, tener la habilidad para simplificarla hasta lo más mínimo posible.
- Álgebra: Se refiere a poder aplicar las propiedades de la Aritmética, teniendo símbolos en la expresión.

#### 4. CARACTERIZACIÓN DE LAS TÉCNICAS PARA GAMIFICAR UN SISTEMA

Para Teixes [16], la gamificación en la educación y la formación, es la aplicación de los recursos de los juegos para modificar los comportamientos de los estudiantes, logrando que el resultado de la acción educativa sea efectivo. Adicionalmente, menciona en el campo del aprendizaje de idiomas extranjeros, la plataforma Duolingo, comparando las actividades de motivación que usa el sistema con las técnicas de gamificación, por ejemplo, presentar un examen de certificación a modo de boss fight. También, habla de otra plataforma de idiomas llamada Livemocha; sin embargo, no hace mención de aplicaciones de aprendizaje de matemáticas haciendo uso de gamificación.

Según Marín [17], la educación actualmente no es solo dictar los contenidos que las legislaciones de cada país indican, sino también, en incentivar el estudiante a aprender, introduciendo así, el concepto de gamificación. La autora señala el aporte de esta técnica en cuanto al trabajo en grupo, indicando como los videojuegos sirven para la inclusión, debido a que proporcionan una visión de equidad, socialización e igualdad. Menciona el juego Blokify, el cual es una herramienta que ayuda a desarrollar las habilidades espaciales, donde los estudiantes de Educación Primaria, mostraron habilidades que les permitieron llegar a niveles de diseño de figuras propios de otros niveles educativos más altos. Aunque en el artículo no se exponen más proyectos, la autora considera que la gamificación debe ser recibida con mayores expectativas en el aula.

Contreras [18], menciona algunos acercamientos de la gamificación en la educación, como, por ejemplo, un videojuego relacionado con la independencia de Perú, en donde señala, que los resultados obtenidos, demuestran el efecto

logrado en las calificaciones de los estudiantes. Indica que el juego, FazGame, es una propuesta innovadora, debido a que permite la creación y publicación de juegos educativos sin necesidad de que los profesores y usuarios cuenten con conocimientos de diseño, género de juegos o programación. Del mismo modo, expone más videojuegos, en los cuales concluye la capacidad de estos sistemas para mejorar el rendimiento de los estudiantes, aunque entre los aportes en el artículo, no se hace mención de ninguno relacionado con las matemáticas.

Capell, Tejada y Bosco [19], basados en la relación entre Hearthstone (juego de cartas basado en los personajes de los Héroes del World of Warcraft), y un serious game llamado Jclic, el cual es un entorno para trabajar el cálculo mental en educación primaria, exponen como este último, logra ofrecer un ambiente entretenido y motivante para el estudiante, aunque no al alcance de Hearthstone, debido a la naturaleza de ambos recursos y a la tipología de actividades que proponen uno y otro. Teixes [16], propone una metodología para lograr un correcto sistema gamificado: primero se deben definir los objetivos y el porqué de estos; luego, conocer la audiencia final y su contexto; después, delinear las conductas del objetivo, donde posteriormente, se construirá el sistema gamificado; y finalmente, implementarlo y mantener una integración actualizada. Aunque se mencionan estas fases en el diseño, no se profundiza en cada una de éstas.

Herout [20], explica que los proyectos de aprendizaje son un proceso que incluye el análisis de objetivos educativos, la necesidad de los docentes, la elección del contenido adecuado, su transferencia y su posterior evaluación. Es en este sentido, que exponen el modelo ADDIE (Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación) donde: en el análisis, se conocen los objetivos educativos; en el diseño, se definen las actividades específicas a usar y el aspecto gráfico; en el desarrollo, se incluyen estructuras elementales como sistemas de recompensa, insignias, gráficos, etc.; en la implementación, se enseña el material educativo y el entrenamiento apropiado a los participantes; y por último, en la evaluación, se obtiene la realimentación relacionada con los elementos del juego usado. No obstante, los autores indican una posible pérdida en el enfoque de los temas, si no se define correctamente los objetivos, debido a los elementos de los juegos.

Morschheuser, Werder, Hamari y Abe [21], diseñaron un método para gamificar, argumentando que la mayoría de las implementaciones, han fracasado debido al poco entendimiento en cómo diseñar satisfactoriamente la gamificación. El método que proponen, se puede dividir en siete fases: (1) Preparación del proyecto: se debe listar los objetivos, priorizarlos y justificarlos, evaluar si la gamificación es aplicable en el objetivo, en caso de serlo, identificar sus requerimientos; (2) Análisis: se realiza un análisis del contexto (identificarlo y entenderlo, además de definir métricas de éxito), luego un análisis del usuario (objetivos, necesidades y motivaciones); (3) Ideación: se realiza una tormenta de ideas para luego consolidarlas. (4) Diseño: se realiza un plan iterativo entre diseñar el concepto, crear el prototipo y evaluarlo; (5) Implementación: se unen los diseños realizados, para realizar un enfoque de gamificación; (6) Evaluación: se prueba el prototipo (se observa el comportamiento del usuario); y (7) Monitoreo: se realiza una constante evaluación, que tiene como finalidad, alcanzar los objetivos propuestos. Los autores indican que los desarrolladores que no tienen experiencia desarrollando plataformas gamificadas, deben ser entrenados.

Teniendo en cuenta estas tres metodologías y reconociendo la necesidad de tener una información detallada de cómo implementar cada fase y su relación con el proceso de desarrollo de un software, se eligió la técnica de Morschheuser [15] para gamificar un proyecto, conocida como la metodología de las siete fases.

## **5. GAMIFICACIÓN DEL SISTEMA TUTORIAL CON BASE EN LAS DIFICULTADES DE APRENDIZAJE**

En esta sección, se gamifica el STI por medio de la metodología de Morschheuser. En este sentido, se desarrollaron las primeras cinco fases, mientras que las demás, se tomaran como trabajo futuro.

### **5.1 Preparación del Proyecto**

En esta fase, se listan los objetivos, se justifican y se identifican los requerimientos de éstos.

#### **1. Objetivos del STI**

- Desarrollar la capacidad para la resolución de operaciones aritméticas, teniendo en cuenta el orden de las operaciones.
- Desarrollar la capacidad para solucionar una expresión, aplicando las propiedades de la potenciación y radicación.
- Determinar el símbolo como representante de diferentes valores.
- Desarrollar la habilidad para distinguir el símbolo igual como equivalencia y una expresión como resultado.
- Desarrollar la capacidad para la transición de lo particular a lo general
- Representar variables en el contexto de la resolución de un enunciado.
- Desarrollar la capacidad para simplificación de expresiones.
- Manipular las propiedades del Álgebra para una mayor simplificación de las expresiones.

2. *Justificación.* Con base a la investigación realizada respecto a las dificultades en el aprendizaje del Álgebra, se identifican los anteriores objetivos, con la finalidad de interiorizarle al estudiante, la transición de la Aritmética al Álgebra. El orden de los objetivos representa la prioridad, es decir, la secuencia de aprendizaje que debe afrontar el alumno para superar las dificultades.

- *Requerimientos*
  - Módulo de dominio: A este le corresponde tener una gran variedad de actividades para cada objetivo, así mismo, debe ser capaz de solucionar las actividades y clasificar su dificultad.
  - Módulo de estudiante: Este módulo, es responsable de almacenar los factores involucrados en la resolución de las actividades. Es por ello que guarda el progreso de cada alumno y de su proceso en general.
  - Módulo de gamificación: Responsable de procesar los factores involucrados en las actividades para elegir el estímulo correcto para mantener al estudiante entretenido.
  - Módulo de interfaz: Le concierne generar la vista según el proceso en el que se encuentre el estudiante y generar las animaciones, sonidos e imágenes, indicadas por el módulo de gamificación. Adicionalmente, poseer una vista donde se pueda visualizar: el concepto, los ejemplos y los retos, según necesite el estudiante.
  - Módulo de tutor: Por medio de una técnica de inteligencia artificial, tiene la obligación de otorgar la actividad necesaria, según la información del módulo de estudiante y de tener la capacidad para ajustar el nivel de dificultad.

## 5.2 Análisis

Se realiza un análisis del contexto en el que se desenvuelve el sistema y de los usuarios que intervienen en éste.

1. *Contexto*. En términos tecnológicos, se usó PostgreSQL para el motor de base de datos y en el lado del servidor, se usó Node.js, con la intención de mantener tanto el *back end* como el *front end* con el mismo lenguaje, siendo el cliente desarrollado en React.js, el cual es un *framework* de JavaScript. Por otro lado, el software estará orientado a instituciones educativas que busquen complementar el proceso de aprendizaje del Álgebra.
2. *Usuarios*. Los usuarios son estudiantes, que en la mayoría de los casos tienen entre 13 y 14 años, pertenecientes al grado octavo o que actualmente están aprendiendo sobre Álgebra. Este público busca que su aprendizaje se torne en momentos lúdicos, especialmente, materias como las matemáticas. La motivación de los estudiantes, es mejorar el desempeño académico, lograr altas calificaciones y perfeccionar su habilidad para estudiar temas en menor tiempo. Para medir su desempeño dentro del sistema, se deben tener como métricas en cada actividad: la cantidad de intentos realizados, el tiempo invertido, los aciertos, el tipo de error y la racha (secuencia de intentos sin equivocarse). Además, otorgar animaciones según la respuesta del estudiante. Y finalmente, incluir una tabla en la vista del perfil, donde puedan visualizar su progreso.

## 5.3 Ideación

Respecto a cada objetivo del STI, formulado en la sección anterior, se realizó una tormenta de ideas, las cuales se consolidaron las siguientes actividades:

1. *Aritmética*
  - Prioridad: Identificar entre las opciones, el operando con mayor prioridad.
  - Siguiendo paso: Identificar entre las opciones, el primer siguiente paso de la expresión.
  - Resolver: En base a un ejercicio, resolver hasta su más mínima expresión.
2. *Propiedades*
  - Prioridad: Identificar entre las opciones, la propiedad presente.
  - Siguiendo paso: Identificar entre las opciones, otra expresión que sea equivalente.
  - Resolver: En base a un ejercicio, resolver hasta su más mínima expresión.
3. *Generalización*
  - Enunciado: Identificar entre las opciones, el enunciado que satisfaga la expresión.
  - Reemplazar: Resolver la expresión, si se reemplaza la incógnita por un valor.
4. *Ecuaciones*
  - Igual: Identificar entre las opciones, otra expresión que sea equivalente.
  - Resolver: Resolver la igualdad en ambas partes, hasta su más mínima expresión.
5. *Patrones*
  - Secuencia: Identificar entre las opciones, la secuencia de la imagen.
  - Común: Identificar entre las opciones, el valor que genera la secuencia.
  - Fórmula: Escribir la fórmula que generaliza la secuencia.
6. *Modelización*
  - Fórmula: Identificar entre las opciones, la expresión matemática que representa el enunciado.
  - Enunciado: Identificar entre las opciones, el enunciado que represente la fórmula.
  - Resolver: En base a un ejercicio, resolver hasta su más mínima expresión.

## 7. Simplificación

- Propiedad: Identificar entre las opciones, la propiedad presente.
- Equivalencia: Identificar entre las opciones, otra expresión que sea equivalente.
- Resolver: En base a un ejercicio, resolver hasta su más mínima expresión.

## 8. Álgebra

- Propiedad: Identificar entre las opciones, la propiedad presente.
- Equivalencia: Identificar entre las opciones, otra expresión que sea equivalente.
- Resolver: En base a un ejercicio, resolver hasta su más mínima expresión.

Como se observa en la caracterización realizada, la transición de Aritmética al Álgebra, es un proceso que contiene diferentes ámbitos, los cuales dificultan la interiorización de este cambio, resaltando los tópicos identificados como esenciales para realizar correctamente la transición. Aun así, para desarrollar los tópicos, es necesario gamificar las actividades y es por ello, que se hace uso de la metodología de las siete fases, en donde se identificaron los objetivos del proyecto, su justificación y sus requerimientos, además se analizó el contexto y se idearon las actividades a desarrollar, siendo esto, las bases del STI a diseñar en la siguiente sección.

### 5.4 Diseño

Para la fase de diseño, se tomó cada uno de los módulos que componen la arquitectura de un Sistema Tutorial Inteligente.

1. *Diseño del Módulo de Dominio.* Permite al STI comparar las acciones que realiza el estudiante con las que realiza el sistema, con el objetivo de evaluar lo que conoce o no el estudiante. En este módulo, se definió la ruta de aprendizaje, es decir, la secuencia de conocimientos a adquirir, para realizar la transición de Aritmética al Álgebra. Esta secuencia, está definida por los objetivos planteados anteriormente; de igual manera, las actividades a estos temas son los identificados en la etapa de ideación. Este módulo está compuesto por tres sub-módulos: el primero está encargado de brindar el material teórico respecto a uno de los tópicos del Álgebra; el segundo, trae los ejemplos según la necesidad del estudiante; y el último, se encarga de obtener las actividades, las cuales es tan divididas por tópicos, que, a su vez, están clasificadas por tipos de reto, donde cada uno de estos, tiene un rango de dificultad.
2. *Diseño del Módulo de Interfaz.* Este componente, siempre estará interactuando con el módulo de estudiante y de tutor, por medio de eventos, que disparan un plan específico para guiar al usuario. La vista estará compuesta de tres interfaces: el login, que sirve para la seguridad del sistema; el perfil, encargado de visualizar la información relevante del estudiante, como su progreso, historial e información personal; y por último, la vista de la actividad, el cual es el sitio principal, donde se carga la actividad a desarrollar, según indique el módulo tutor. La página tiene dos pestañas a su izquierda donde se puede visualizar el contenido del tópico (la teoría) y ejemplos del mismo.
3. *Diseño del Módulo de Gamificación.* Al momento del estudiante interactuar con la interfaz en la solución de las actividades, es necesario mantener un ambiente motivante y divertido. Para lograrlo, se definieron tres características: las mecánicas, las cuales son de desafío, debido a que las actividades implican un esfuerzo personal para resolverlas; la dinámica, que es progresiva, puesto que tiene en cuenta la evolución y el crecimiento del estudiante; por último, la estética, esta se manifiesta por medio de componentes de la gamificación, basados en los siguientes elementos: logros, iconos, regalos, puntos, racha, tiempo y vidas. Así mismo, durante la solución de una actividad, el estudiante recibirá diferentes estímulos dependiendo de su progreso.
4. *Diseño del Módulo de Estudiante.* Su composición se da por dos sub-módulos: uno que contiene toda la información personal y académica del estudiante; mientras que el otro, representa el conocimiento. Al momento de estar resolviendo una actividad, cada respuesta dispara un plan que tiene como objetivo, guardar toda la información que se percibe en el momento.
5. *Diseño del Módulo Tutor.* Al consultar el módulo de estudiante, se obtiene un historial del progreso que se lleva desde la creación del perfil, de este modo, el tutor aprende cuales son las necesidades actuales del estudiante, para posteriormente, indicarle al módulo de dominio, cuál es el tipo de reto que debe resolver.

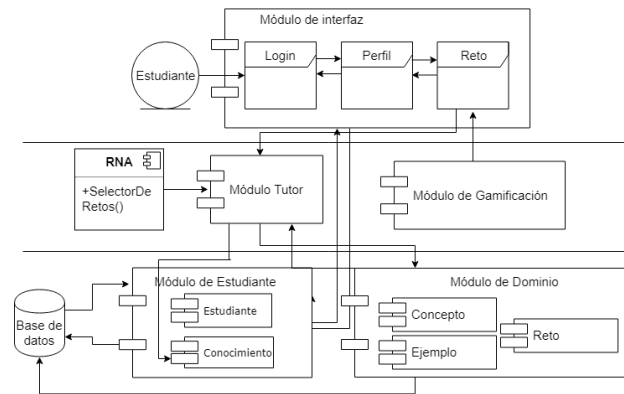
Con base en lo anterior, se diseñó una red neuronal artificial tipo perceptrón multicapa, donde teniendo en cuenta que: cada entrada es el porcentaje de conocimiento respecto a un tópico, en un tipo de reto y en un nivel de dificultad, se tienen entonces, 69 entradas; mientras que en la salida, la red debe indicar cuál es el siguiente reto a resolver, por lo que debe indicar, en formato binario, el tópico, el tipo de reto y el nivel, dando un total de nueve salidas; en cuanto a las ocultas, se propuso un total de 30 neuronas, siendo entonces, una configuración 69-30-9 (69 neuronas de entrada, 30 ocultas y 9 de salida). Teniendo ya diseñados todos los módulos, la arquitectura del STI queda como se muestra en la Figura 2.

### 5.5 Implementación

Siguiendo la metodología de las siete fases, la quinta corresponde a la implementación de los módulos diseñados, en donde se desarrolló el prototipo con base a tecnologías como PostgreSQL para el motor de base de datos y en el lado

del servidor, se usó Node.js, con la intención de mantener tanto el *backend* como el *frontend* con el mismo lenguaje, siendo el cliente desarrollado en React.js, el cual es un *framework* de JavaScript.

Para la obtención del prototipo, se realizó una comunicación completa entre el sistema, donde el módulo de interfaz es quien interactúa con el estudiante, el cual para validar la información del login y obtener los datos a mostrar en la interfaz de perfil, consulta al módulo de estudiante. Así mismo, en la vista del reto, la interfaz consulta al módulo tutor, el cual interactúa con el módulo de estudiante para obtener el conocimiento, con la intención de conocer el tópico, el tipo de reto y la dificultad, que será devuelto a la interfaz, con la finalidad de que este pueda pedirle al módulo de dominio, la información a visualizar. Al iniciar el sistema, el usuario se encuentra con la interfaz de Login (ver Figura 3). La palabra SAAI, es un acrónimo de Sistema de Asesoramiento Académico Inteligente, nombre que se le dio al STI para ser fácilmente recordado por los estudiantes.



**Figura 2.** Arquitectura del Sistema Tutorial Inteligente



**Figura 3.** Interfaz de Login del Sistema Tutorial Inteligente

Luego de que el estudiante de click en ingresar, el módulo de estudiante verifica si la información ingresada es correcta. En caso de no serlo, mostrara un mensaje indicando que los datos no son válidos; en caso de ser correcto, se avanzara a la interfaz de Perfil (ver Figura 4).

#	Fecha	Tópico	Tipo Reto	Expresión	Tiempo	Respuesta	Correcta
1	2018-05-14	Aritmética	Opcion multiple	$2 + 4 = 6$	3563	Suma	✓
2	2018-05-14	Aritmética	Opcion multiple	$5 \cdot 3$	862	Multiplicación	✓
3	2018-05-14	Aritmética	Opcion multiple	$6 \cdot 3$	6920	Multiplicación	✗

**Figura 4.** Ejemplo de Interfaz de Perfil para un estudiante con poco uso del STI

En la interfaz de Perfil, el estudiante puede ver los puntos que tiene y su nivel. Adicionalmente, en la izquierda se encuentra la información estática del estudiante, es decir, su nombre, institución y grado. En la derecha, se encuentra

el progreso respecto a los tópicos del Álgebra y una tabla con el historial de acciones del estudiante. A partir de este sitio, el estudiante al dar click al botón de Estudiar, ubicado arriba en el centro, se dirigirá a la interfaz de Reto (ver Figura 5).

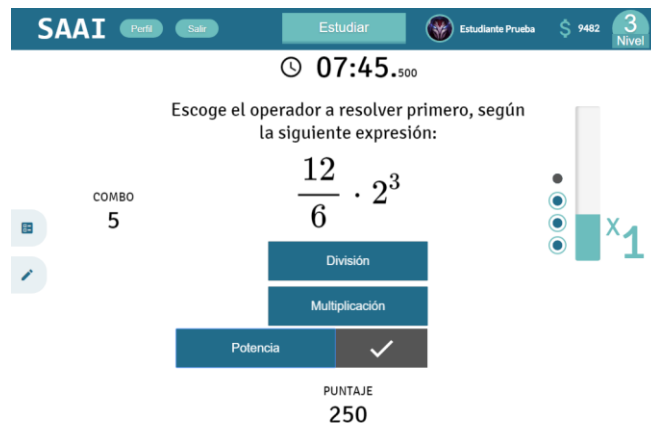


Figura 5. Ejemplo de reto en el tópico de Aritmética.

Ubicado en la interfaz de estudiante, se encuentra a la izquierda dos botones, uno encargado de mostrar la teoría según necesite el estudiante (ver Figura 6) y el otro, encargado de mostrar ejemplos, con base en las necesidades del estudiante (ver Figura 7).

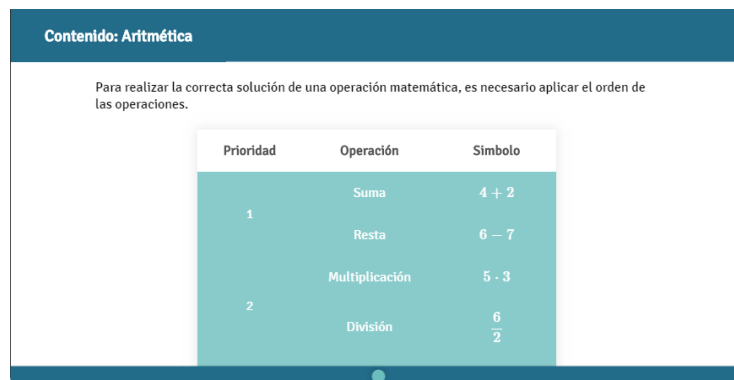


Figura 6. Teoría para el tópico de Aritmética

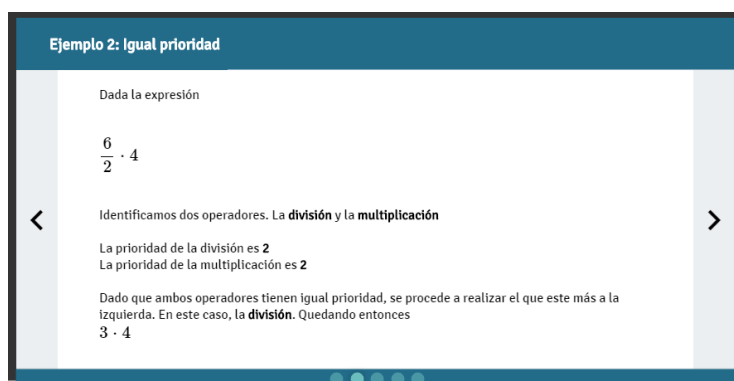


Figura 7. Ejemplo para el Tópico de Aritmética

## 6. REFLEXIÓN

Para el desarrollo de un STI, no basta con identificar el área que se pretende profundizar, sino también, que metodologías de enseñanza existen y las dificultades de aprendizaje en el área. Adicionalmente, es necesario explorar diferentes metodologías para gamificar al sistema y elegir la que mejor se ajuste a las necesidades del desarrollo de software. Con base a la metodología elegida, se debe hacer énfasis en la etapa de ideación, es decir, la fase en la que se definen las actividades que implementaremos más adelante. Estas actividades, deben ser, en lo posible, parametrizadas, de modo que el sistema tenga más escalabilidad para trabajos futuros. La mejor manera para lograr que las actividades sean parametrizadas, es realizar un buen diseño del módulo de dominio, específicamente, diseñando la biblioteca de retos a implementar, de modo que se pueda analizar la información que comparten los diferentes retos.

Por otro lado, para el diseño del módulo tutor, es necesario la exploración de diferentes técnicas de IA y de conocer en profundidad, el objetivo del STI con el estudiante. En este sentido, se debe tener en cuenta, que la intención del



sistema es acompañar el proceso de aprendizaje del estudiante y no de sustituir por completo al docente. Adicionalmente, el diseño de la IA a implementar, debe considerar la capacidad del sistema para entretener al estudiante, es decir, es necesario que el módulo tutor maneje los elementos de gamificación apropiadamente por medio de la IA, por lo que el STI debe ser altamente reactivo a la manipulación del estudiante con el sistema.

## **7. CONCLUSIONES**

En el aprendizaje del Álgebra, intervienen múltiples dificultades que deben ser consideradas, las cuales pueden ser enfrentadas, por medio de diferentes actividades que busquen solucionar las dificultades. Sin embargo, estas actividades están limitadas a su capacidad para adaptarse a un sistema virtual, es decir, limitadas a su nivel de abstracción.

Por otro lado, los STI diseñados para el aprendizaje del Álgebra, no tienen como base las dificultades para aprender dicha área, adicionalmente, no poseen una metodología que permita gamificar el sistema, llevando al poco uso del sistema. Es por ello, que el STI propuesto presenta una novedad, debido a que su módulo de dominio está basado en las dificultades en el aprendizaje del álgebra. En donde se evidencio, la complejidad para implementar las actividades planteadas y de definir una estructura general para todos los tópicos, de modo que facilitara el manejo de la diversidad de los ejercicios.

Adicionalmente, se implementó una metodología similar al ciclo de vida de un software, que logra gamificar el sistema, Sin embargo, se pudo observar la necesidad de incluir una etapa entre las fases, donde se definiera las mecánicas de las actividades, es decir, el flujo de acciones que se deben realizar de acuerdo a un evento.

## REFERENCIAS

- [1] Ma, W. et al. (2014). Intelligent Tutoring Systems and Learning Outcomes: A Meta-Analysis. *Journal of Educational Psychology* 106(4), 901-918.
- [2] Samy, S. (2016). An Intelligent Tutoring System Authoring Tool. *Faculty of Engineering & Information Technology. Journal of Scientific and Engineering Research* 3(5), 63-71.
- [3] González, C., Mora, A. & Toledo, P. (2014). Gamification in intelligent tutoring systems. In: *Second International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*.
- [4] Zatarain, R., Barrón, M. & García, J. (2016). Sistema tutor afectivo para el aprendizaje de las matemáticas usando técnicas de gamificación. *Instituto Tecnológico de Culiacán. Sinaloa, México*.
- [5] Nour, N. & Samy, S. (2017). Mathematics Intelligent Tutoring System. *International Journal of Advanced Scientific Research* 2(1), 11-16.
- [6] Wang, X. (2015). The Literature Review of Algebra Learning: Focusing on the Contributions to Students' Difficulties. *Creative Education* 6, 144-153.
- [7] Fancsali, S. et al. (2016). Implementation Factors and Outcomes for Intelligent Tutoring Systems: A Case Study of Time and Efficiency with Cognitive Tutor Algebra. *Human-Computer Interaction Institute. Carnegie Mellon University*.
- [8] Hamari, J. & Parvinen, P. (2016). Introduction to Gamification: Motivations, Effects and Analytics Minitrack. In: *49th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- [9] Ma, W. et al. (2014). Intelligent Tutoring Systems and Learning Outcomes: A Meta-Analysis. *Journal of Educational Psychology* 106(4), 901-918.
- [10] Rosado, C., Sánchez, D. & García, R. (2016). Sistema 4MAT apoyado con tutores inteligentes en estudiantes de Ingeniería. *Latin-American Journal of Physics Education* 10(1), 1-8.
- [11] Faghihi, U. et al. (2014). How Gamification Applies for Educational Purpose Specially with College Algebra. In: *5th Annual International Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures*.
- [12] Esquinas, A., (2008). Dificultades de aprendizaje del lenguaje algebraico: Del símbolo a la formalización algebraica: aplicación a la práctica docente. *Universidad Complutense de Madrid*.
- [13] Badia, A. et al. (2013). Dificultades de aprendizaje de los contenidos curriculares. *Editorial UOC*.
- [14] Sosa, L., Flores, E. & Carrillo, J. (2015). Conocimiento del profesor acerca de las características de aprendizaje del álgebra en bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias* 33(2), 173-189.
- [15] Jupri, A. & Drijvers, P. (2016). Student Difficulties in Mathematizing Word Problems in Algebra. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education* 12(9), 2481-2502.
- [16] Teixes, F. (2014). Gamificación: fundamentos y aplicaciones. *Editorial UOC*.
- [17] Marín, V. (2015). La Gamificación educativa. Una alternativa para la enseñanza creativa. *Universidad de Córdoba, España*.
- [18] Contreras, R. (2016). Juegos digitales y gamificación aplicados en el ámbito de la educación. *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia* 19(2), 27-33.
- [19] Capell, N., Tejada, J. & Bosco, A. (2017). Los videojuegos como medio de aprendizaje: Un estudio de caso en matemáticas en Educación Primaria. *Pixel-Bit* 51, 133-150
- [20] Herout, L. (2016). Application of gamification and game-based learning in education. *Czech University of Life Sciences Prague*.
- [21] Morschheuser, B. et al. (2017). How to gamify? A method for designing gamification. In: *50th Hawaii International Conference on System Sciences*.

El primer Drone de la UMNG será utilizado en situaciones de emergencia el cual tendrá su botiquín equipado con sus respectivos instrumentos dependiendo del escenario del paciente, además cuenta con su respectiva Tablet la cual será cargada con el video respectivo del escenario que esté viviendo el paciente. Con este proyecto buscamos llegar a aquellos lugares donde el equipo médico se les dificulta tanto llegar por las distancias o por las diferentes emergencias que se puedan presentar. Por medio de la utilización del Drone ambulancia se busca establecer parámetros para una exitosa intervención en las emergencias donde se necesite contar con intervención médica de primera necesidad, implementadas de forma práctica por cualquier persona que esté dispuesta a colaborar en la situación donde se necesite una intervención médica especializada en las cercanías, por medio de la implementación de protocolos establecidos y bajo la supervisión de personal calificado en las ciencias de la salud. Por medio de diferentes pruebas que se van a realizar en el campus de la UMNG verificaremos la conectividad entre la central y el escenario del paciente, la calidad y claridad del video de la Tablet y tener los botiquines completos con los respectivos instrumentos. Este proyecto nace de la idea de ser una ayuda eficaz en situaciones de emergencia o desastre natural y lo que tenemos claro es que nunca buscamos reemplazar el trabajo de un doctor lo que buscamos con este Drone ambulancia es ser una ayuda en emergencias de primera necesidad. Para el futuro buscamos mejorar las pruebas que se pueden generar en el transcurso del proyecto, mejorar las diferentes falencias que podamos encontrar durante el proyecto para entregar el proyecto final y tener el primer Drone en el campus UMNG.

## 1. INTRODUCCIÓN

Como respuesta a diversas situaciones a las que se pueden enfrentar, en la Universidad Militar Nueva Granada, mediante un grupo de estudiantes de semillero, se decidió proponer una iniciativa como parte de la solución para situaciones adversas que se puedan presentar, mediante la implementación de un Drone Ambulancia. Este vehículo no tripulado llega para ayudar a al paciente en una situación crítica. Existen situaciones de emergencia a las cuales no se sabe cómo hacer frente, debido a que nunca se espera estar en una situación como esa, casos como un desmayo o una persona que está sufriendo de una convulsión, lo primero que hacemos es llamar a emergencias, pero a veces por situaciones de distancia o el tráfico estos equipos médicos no llegan a tiempo. Por lo anterior, surge una motivación a implementar el Drone ambulancia en nuestro campus para ofrecer una atención casi inmediata dentro del campus en casos de emergencias o desastres naturales, ya que el Drone tiene la facilidad de llegar a los lugares donde los equipos médicos se les dificulta llegar. Por ejemplo: la muerte cerebral se da entre los 4 y 6 minutos, que es el tiempo que se toma el equipo médico de tierra en llegar al lugar a atender al paciente.

Para el desarrollo de este proyecto tenemos como objetivos: Garantizar la comunicación desde el lugar donde se encuentra el paciente y la central donde se encuentra el médico. Asegurar la calidad y la claridad del video de la Tablet en el caso que perdamos comunicación con la central. Tener los botiquines necesarios y equipados con las diferentes emergencias que se puedan presentar dentro del campus UMNG. Verificar la calidad del vuelo del Dron, como lo es el aterrizaje y despegue del suelo para brindar al médico una mejor perspectiva de la emergencia. Establecer tiempos óptimos de respuesta a situaciones de emergencias, independientemente del lugar o la situación en la que se encuentre el paciente a tratar.

### 1.1 Desastres naturales

Los desastres naturales o mejor conocidos como catástrofes naturales son eventos inesperados que por lo general son causados por los cambios climáticos, estos desastres naturales causan daños a las propiedades, generan una gran pérdida económica o pérdida de vidas [1].

La pérdida de vidas se da porque los desastres naturales acaban con la casi todo y en estas situaciones el equipo médico terrestre se le complica llegar a un lugar a ayudar o asistir a los diferentes pacientes. Esto es una de las grandes motivaciones porque implementar el Drone ambulancia, ya que este disminuye el tiempo de llegada desde la central a donde esté el paciente. El Drone en situaciones de desastres naturales es capaz de llegar a los lugares más recónditos, ya que este cuenta con cámara de alta resolución lo que se convierte en una ayuda para que el médico para determinar la ubicación del paciente y así tener una idea de la situación y el escenario del paciente, además ayudar a salvar una vida y reducir los números de mortalidad es uno de los objetivos al momento de implementar el Drone ambulancia como una ayuda y analizar que el Drone ambulancia no se va a convertir en un reemplazo para el equipo médico [2]. Los Drones permiten analizar desde el espacio aéreo las estructuras afectadas en la zona del impacto, así el equipo médico se puede asegurar en qué lugares pueden intervenir y del mismo modo buscar más víctimas en el aérea [2].

---

<sup>1</sup> [tigum@unimilitar.edu](mailto:tigum@unimilitar.edu)

## **1.2 Atención prioritaria**

Los adultos mayores, niños y niñas, adolescentes, mujeres embarazadas y personas en discapacidad son la prioridad en situaciones de emergencia, como lo son las catástrofes naturales y emergencias cotidianas, por ejemplo, un choque, una persona desmayada o una convulsión. Estos son algunos casos que se convertirán en la prioridad del equipo médico, claro está también depende el escenario de la persona ya que este también se convierte en la prioridad ya que la primordial es salvar vidas humanas [3].

## **1.3 Salud en sitios apartados (mar)**

Las islas son los sitios más apartados y los que el medio de transporte es lo más complicado ya que su principal medio de transporte es marítimo y se convierte en un obstáculo para el equipo médico al momento de atender alguna situación, lo que le deja un espacio al Drone ambulancia ya que este con gran facilidad es capaz de reducir el tiempo de la llegada al paciente y ofrecer una atención oportuna y salvar una vida [1].

## **1.4 Problemas de salud luego de un desastre natural**

Luego de un gran desastre natural estos sorpresivamente no generan enfermedades infecciosas, aunque en casos especiales se aumenta la posibilidad de una transmisión. A corto plazo el aumento de enfermos se puede observar en mayor frecuencia en la contaminación fecal al agua y los alimentos, lo que genera la gran mayoría de las enfermedades [4].

En otros casos se ha podido observar como en algunas zonas puede existir un aumento de enfermedades transmitidas por vectores de desorganización de las actividades de control y es posible que lluvias torrenciales e inundaciones arrastren con los insecticidas de las paredes de los edificios y generen criaderos de mosquitos; así mismo traer animales salvajes o domésticos y generar infecciones zoonóticas. En los casos de desastres complejos, en los cuales la malnutrición, los hacinamientos y la ausencia de condiciones sanitarias son los problemas más comunes se generan enfermedades como lo son: brotes catastróficos de gastroenteritis, los cuales son causados por la cólera como sucedió en Rwanda en 1994 [4].

El riesgo de las enfermedades transmisibles es proporcional a la densidad y el desplazamiento de la población puesto que estos factores aumentan la demanda del agua y los alimentos. Luego de esto crece el riesgo de contaminación como sucede en los campos de refugiados ya que se interrumpen los servicios sanitarios como lo es el agua potable y les resulta imposible restablecer los programas ordinarios de salud pública [4].

## **1.5 Desplazamientos de la población**

Cuando se genera un gran desplazamiento de población de manera espontánea se genera la necesidad de proporcionar asistencia humanitaria. Esto se da ya que la población se desplaza en zonas urbanas, donde los servicios públicos son incapaces de afrontar la masiva llegada de las personas y consiguiente de esto se genera un aumento en la morbilidad y la mortalidad. Cuando el desastre se desarrolla en las viviendas, se producen grandes movimientos de la población dentro de las zonas urbanas ya que los afectados tienden a buscar cobijo en sus familiares y amigos [4].

## **1.6 Alimentación en un Desastre Natural**

Luego de un desastre natural una de las cosas que más se ve afectada es la alimentación de la población y este se da por dos razones, la primera la destrucción de los depósitos de alimentos y la segunda la desorganización de los sistemas de distribución ya que puede impedir el acceso de alimentos a la comunidad afectada, lo que genera grandes problemas de desnutrición [4].

Los desbordamientos de los ríos y las crecidas del mar deterioran las despensas de los alimentos de los hogares y arruinan los cultivos, lo cual interrumpe y provocan penurias locales. En casos de sequías prolongadas como lo es el caso de África las personas que quedan sin hogar suelen ser quedar completamente expensas de los recursos alimentarios que son enviados desde el exterior durante variables de tiempo [4].

## **2. APLICACIONES DE LOS DRONES EN SALUD**

Desde el nacimiento del primer "Drone ambulancia", se generó un debate ya que el primer prototipo contaba con un grupo de medicamentos y un desfibrilador mientras que al otro lado del mundo diseñaron el primer Drone del tamaño de un vehículo, a diferencia del primer Drone este cuenta con una camilla que no requiere del equipo médico para trasladar al paciente desde el lugar del incidente hasta el hospital [5].

### **2.1 Drone Ambulancia**

El Drone ambulancia, está diseñado para salvar vidas sin tener una necesidad de pilotos o médicos de guardia, las zonas rurales, aquellas zonas alejadas de las capitales son las que se van más afectadas ya que tienen que esperar horas hasta la llegada del equipo médico terrestre. Este fue diseñado para ahorrar tiempo y ofrecer una atención oportuna sin tener como límite la distancia. El diseño de este Drone ambulancia es similar al de un carro, lo cual le da la facilidad de poder aterrizar en lugares donde los helicópteros médicos no pueden hacerlo lo que facilita la atención del paciente. El diseño de este Drone está a cargo de la empresa estadounidense Argodesign, ubicada en Austin, Texas.

El fundador de la empresa, Mark Rolson, explicó que la idea nace de una alternativa de los ya conocidos Drones Militares [5].

El modelo de Argodesign se conduce a través del sistema GPS, este cuenta con su camilla equipada de todos los instrumentos médicos necesarios para el transporte del paciente desde el lugar del incidente hasta el hospital. Este Drone no reemplazará el trabajo del equipo médico ya que se necesitará del equipo médico para descender al paciente del Drone para ser trasladado hasta el médico para su pronta atención. Este modelo solo fue diseñado para facilitar el transporte del paciente [5].

## **2.2 Drone en el soporte clínico**

El creador del primer Drone de Soporte Clínico es AlecMomont, ingeniero de diseño industrial presentó su Drone el cual cuenta con seis hélices y puede volar a una velocidad de 100 kilómetros por hora, tiene la facilidad de movilizarse de manera independiente, este localiza la urgencia por medio de datos del GPS y de este modo llegar en minutos al lugar de la emergencia [6]. Este proyecto responde a una razón particular ya que este reduce la respuesta en cuanto al tiempo a la llegada del lugar de la emergencia en comparación del tiempo de respuesta del equipo médico terrestre. Haciendo uso del GPS para volar hasta el lugar donde está el paciente, el personal médico será capacitado para poder generar los respectivos pasos para la correcta atención que requiere el paciente, estas serán generadas por medio de la cámara y el micrófono que vienen incorporados al Drone [6].

El radio de acción de este Drone es de 12 kilómetros y es capaz de transportar hasta los 4 kilos, el cual es el complemento perfecto para las catástrofes naturales que sucedan ya que suministrar servicios básicos a zonas de difícil acceso [7]. El proceso del Drone que siguió AlecMomont fue: diferentes sesiones con expertos en Drones, personal médico y profesionales en diferentes campos para llevar a cabo este proyecto. El resultado de estas sesiones mostró un valor agregado por la velocidad de despliegue, precisión y vuelo automatizado en el campo de emergencia. El objetivo del proyecto se definió para crear una red de respuesta de alta velocidad que funciona de forma descentralizada para proporcionar respuestas más ágiles. El diseño del Drone se basó en una caja de herramientas de marco plegable que pudiera volar y fuera compacto el cual contenía una cantidad de suministros esenciales para el soporte vital. El primer prototipo del Drone está equipado por un desfibrilador externo automático que cuenta con una disminución de tiempo el cual conduce un 10% de aumento en las tasas de supervivencia [8].

## **3. CASOS DE DRONE AMBULANCIA EN COLOMBIA**

Estudiantes de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia (Unal) implementaron un Drone que será utilizado como paramédico cuando la vida de una persona se encuentre en riesgo y le sea difícil al equipo médico llegar al sitio donde se encuentra el paciente [9]. El proyecto que tiene como objetivo ofrecer drones ambulancia son los denominados FH-420 los cuales son los encargados en asesorar los primeros auxilios para facilitar el transporte del paciente y aumentar su posibilidad de supervivencia [9].

Juan Pablo Gonzales es uno de los estudiantes encargados en desarrollar el proyecto afirma que: “El uso de dispositivos tecnológicos aéreos no tripulados, dirigidos a larga distancia o por medio de inteligencia artificial, es útil para llegar a espacios que de otra manera son prácticamente inalcanzables” del mismo modo Gonzales también hace referencia al tiempo de respuesta del Drone: “La capacidad de respuesta que se obtiene es casi inmediata, lo que contribuiría a paliar las complicaciones que se puedan presentar en diferentes emergencias” [9]. El objetivo principal del Drone de la Universidad Nacional de Colombia es asistir los accidentes que se puedan presentar en las carreteras o avenidas de la ciudad, ya que el equipo médico tarda mucho tiempo en llegar debido a que a veces las zonas geográficas o el estado climático genera un sin número de complicaciones como por ejemplo que la población no cuente con un centro médico cercano [9].

El proyecto forma parte de un negocio llamado FlyHealth Drones (FHD), el cual se desarrollará en un principio en las zonas remotas y concurridas como los son los parques naturales y senderos ecológicos ya que no siempre el equipo médico cuenta con buena suerte y no puede llegar fácilmente a socorrer el accidente [9]. El funcionamiento del Drone de la UN cuenta con una cámara infrarroja la cual es capaz de detectar personas extraviadas de una manera más sencilla además de contar con luces de señalización para que con estas se pueda indicar el lugar donde se presentó el accidente. Además de contar con un sistema GPS, una cámara de alta definición, sistema de parlantes y micrófonos para ofrecer una mejor atención [9].

## **4. MÉTODO**

Este tipo de investigación que se realiza desde la ingeniería, requiere del apoyo de un tutor de la Facultad de Medicina de UMNG. Para la ejecución del Drone ambulancia en el campus UMNG se tomó como base el trabajo del Ing. AlecMomont que desarrolló en Holanda un Drone ambulancia en servicio a la comunidad. Así, se analizó el escenario de la Universidad Militar Nueva Granada y los protocolos de prueba del Drone ambulancia y el impacto que da a la comunidad universitaria en situaciones de emergencia. La UMNG a través del grupo de investigación GIDAM, liderado por el Prof Dr Leonardo Solaque, tiene el Drone Matrice 600 Pro, el cual con su rendimiento, vuelo mejorado y capacidad de carga permite portar un botiquín hasta de 2500g, equipado con los instrumentos necesarios para atender el escenario del paciente.

Primero, se recibe una llamada o la notificación de alguna emergencia en el campus UMNG; segundo el piloto del Drone genera las coordenadas necesarias para el encuentro con el paciente; el Drone se equipa con una Tablet la cual cuenta con el video necesario el cual genera las instrucciones mínimas necesarias para que la persona que se encuentra con el paciente siga el paso a paso del video para generar una buena atención mientras llega el equipo médico; Tercero, con la Facultad de Medicina de la UMNG, un médico acompaña el procedimiento sobre el paciente y generar soluciones a distancia.

Las pruebas de campo se han focalizado sobre el vuelo, el rendimiento y la capacidad de carga del Drone. En las pruebas de campo se valida el tiempo de respuesta del equipo y la reacción de la persona al estar con el paciente. Lo más importante en estas pruebas es la seguridad del paciente que es la razón principal tema de esta investigación. El bienestar del paciente es nuestro objetivo, salvar vidas y ser una ayuda son las grandes motivaciones para la realización y ejecución de este proyecto

#### **4.1 Ejecución**

1. Pruebas para asegurar la comunicación entre la central y la persona que esté ayudando al paciente, tener un lenguaje claro para que la persona que está ayudando al paciente en la emergencia pueda seguir las órdenes del médico a cargo.
2. Cargar en la Tablet los respectivos videos dependiendo de la emergencia presentada, garantizar la calidad y claridad del video para que la persona que está atendiendo al paciente pueda brindar una correcta atención al paciente. Verificar los videos constantemente y las posibles actualizaciones que puedan requerir los videos para mejorar la atención del paciente.
3. Con ayuda del médico, por medio de las diferentes capacitaciones, conocer lo que necesitamos tener en un botiquín básico, saber qué instrumentos debe tener cada botiquín dependiendo de la emergencia o del paciente. Con estas capacitaciones saber el manejo de estos instrumentos para brindar la mejor atención.
4. El piloto se ha capacitado para garantizar un vuelo casi perfecto del Dron Ambulancia, con esto asegurar un despeje perfecto, la estabilidad durante el vuelo para que el botiquín llegue en perfecto estado, de mismo modo el aterrizaje del Drone para que este no afecte el lugar de la emergencia ni perturbe la situación del paciente. Al momento de dejar el botiquín al lado del paciente garantizar una buena visibilidad de la situación para tener un control sobre el estado de salud del paciente.

Estos son los aspectos que evaluar para redactar los protocolos y dejar prueba de los diferentes escenarios y pruebas realizadas para el buen funcionamiento del Dron Ambulancia:

- Comunicación desde el lugar donde se encuentra el paciente y la central donde se encuentra el médico.
- Asegurar la calidad y la claridad del video de la Tablet en el caso que perdamos comunicación con la central.
- Poder contar con botiquines (kit de salud) y los instrumentos necesarios en el momento de la emergencia.
- Desempeño de vuelo del Dron, aterrizaje y despegue.

### **5. RESULTADOS**

Se implementa un protocolo alternativo y de soporte para la atención de emergencias médicas básicas, mediante la implementación de un Drone ambulancia que permite generar tiempos de respuesta menores en relación con los servicios de ambulancia tradicionales. Aplicado a las necesidades de la comunidad la cual se ve afectada conforme avanza el crecimiento en infraestructuras o en situaciones de extrema emergencia, donde se presentan dificultades para que los servicios de emergencia lleguen a prestar servicios de primeros auxilios. Se ofrece un servicio funcional alternativo que permita apoyar a los servicios de emergencias, prestando asesoría a la hora de implementar atención de primeros auxilios en situaciones donde se retrasen los servicios de emergencia. Después de realizar las diferentes pruebas de campo con el Drone ambulancia de la UMNG obtuvimos los siguientes resultados:

- Se diseñan una serie de kits de salud equipados con lo necesario para tender diversos tipos de emergencias.
- Se mide desempeño del vuelo, aterrizaje y despegue del Dron en el escenario cuidando la situación del paciente y sin perder la comunicación con el Dron y el piloto.
- Se logró garantizar la comunicación entre el piloto y la central.
- La persona que acompañaba al paciente pudo seguir muy bien las instrucciones y tuvimos una exitosa extracción del botiquín.
- Ágil respuesta de la central al llamado generado por la persona acompañante del paciente.

#### **5.1 Diseño del drone ambulancia de la universidad Militar Nueva Granada**

El primer Drone ambulancia de la UMNG busca ser utilizado en situaciones de emergencia, el cual contará con su respectivo botiquín equipado con los respectivos instrumentos que sean necesarios para atender la situación del paciente, además cuenta con su respectiva Tablet la cual será cargada con el video respectivo al escenario que está viviendo el paciente. Por medio de la utilización del Drone Ambulancia, se busca establecer parámetros para la intervención en las emergencias donde pueda ser necesaria la intervención médica de primera necesidad,

implementadas de forma práctica por cualquier persona tratante, que esté dispuesto a colaborar en la situación donde sea necesaria una intervención inmediata cuando no haya asistencia médica especializada en las cercanías, mediante de la implementación de protocolos establecidos y bajo la supervisión de personal calificado de la salud. Con este proyecto buscamos llegar a los lugares donde los médicos o ambulancias por diferentes situaciones del lugar no pueden llegar. Buscamos ser la opción más rápida y ágil con la que pueda contar la UMNG en el campus; con este proyecto no queremos reemplazar el trabajo del médico, solo queremos ser una ayuda primaria para el paciente mientras es atendida en el centro médico o se logra estabilizar el paciente.

## 5.2 Tipo y características del Drone

El Drone con el que cuenta la UMNG es el MATRICE 600 PRO cuenta con un gran rendimiento de vuelo y mejor capacidad de carga. Sus brazos y antenas previamente instaladas reducen el tiempo requerido y su diseño modular facilita el montaje de modelos adicionales [10]. El Drone cuenta con un fuselaje equipado con la última tecnología DJI, en el cual se encuentra un controlador de vuelo A3, baterías inteligentes y un sistema de gestión de la batería. Además de su cámara Zenmuse y cardanes que son compatibles con la integración total con software; el Drone M600 PRO es ideal para las aéreas profesionales y aplicaciones industriales. Su fuselaje ha sido facilitado para el transporte con un tren de aterrizaje de liberación rápida y brazos plegables el cual cuenta con un nuevo sistema de amortiguación. La carga máxima de utilidad del Drone es de 6kg, ya que admite sin ningún esfuerzo una gama de cámaras del sistema Micro FourThirds [10].

El sistema integral de baterías quiere decir que si alguna de sus seis baterías se apaga el resto de las baterías seguirá trabajando normalmente. Así mismo el sistema supervisará cada batería durante el tiempo de vuelo lo que garantiza un aterrizaje seguro en el caso de un fallo de una batería individual. [10]. En la Figura 1 se observa el Drone Ambulancia en pruebas de vuelo en el Campus. En la Figura 2 se muestra el exitoso aterrizaje del Drone después del trayecto desde el puesto de control hasta el lugar de destino en el campo. En la Figura 3 se observa el Drone ambulancia con su respectivo kit de primeros durante la fase de pruebas. En la Figura 4 se observa la representación del Drone ambulancia en pruebas de vuelo con el botiquín respectivo a la situación del paciente.



**Figura 1.** Drone Ambulancia en pruebas de vuelo en el campus



**Figura 2.** Aterrizaje del Drone



**Figura 3.** Vista del Drone ambulancia al momento de la llegada a su destino



**Figura 4.** Drone Ambulancia sobrevolando al paciente para generar una vista panorámica al médico en el centro de control

## 5.3 Adaptación drone Matrice 600 Pro al servicio de ambulancia

El Drone Matrice 600 Pro cuenta con un mejor rendimiento, vuelo mejorado y capacidad de carga en comparación con su versión anterior (M600). Cuenta con brazos y antenas las cuales reducen el tiempo para la configuración además de un diseño modular del sistema el cual facilita el montaje de módulos adicionales [10]. El Drone está equipado por la mejor tecnología DJI (fabrica china), incluyendo el controlador, un sistema de transmisión, baterías inteligentes y el sistema de gestión de la batería. El Drone M600 Pro es ideal para fotografías aéreas profesionales y aplicaciones industriales. El Drone cuenta con seis hélices y es capaz de levantar 6 kilos, tiene la posibilidad de plegar sus patas para poder captar contenidos en 360 grados y su sistema de propulsión ha sido diseñado para que no entre polvo con el fin de tener un mejor mantenimiento [11]. El M600 Pro cuenta con la tecnología LightBridge 2, una nueva versión

que tiene la posibilidad de realizar streaming a una calidad de 1080p a 60 imágenes por segundo y garantiza un rango de uso de hasta 4.8 kilómetros. Cuenta con una salida tipo SDI la cual permite emitir en directo formatos 720p a aproximadamente 58 imágenes por segundo o bien 1080i a 50 imágenes por segundo aproximadamente [11].

La manera de controlar el M600 Pro es por medio de la aplicación DJI Go y con este se estrena el controlador A3 en el que hay espacio para tres unidades GPS y la misión de este es conseguir más precisión y seguridad en el vuelo. La cámara con la que el Drone Osmo RAW la cual tiene la capacidad de capturar videos en la mejor calidad 4K con un sensor de 16 megapíxeles y ópticas intercambiables, así mismo añade adaptadores para conectar 512GB de disco en formato SSD [11].



**Figura 5.** Extracción del kit de primeros auxilios



**Figura 6.** Simulación de prueba para generar la solicitud asistencia del Drone



**Figura 7.** Equipa técnico y de control de manejo del Drone ambulancia

## 6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Al finalizar la prueba de campo en el campus de la UMNG, se analiza la aplicabilidad de los botiquines y la fácil extracción del botiquín al momento del aterrizaje del Drone en el lugar de la ubicación del paciente. En cuanto al despegue, vuelo y aterrizaje del Drone tuvimos éxito, el Drone no afecto la situación del paciente, el aterrizaje fue perfecto y se generó un sobre vuelo exitoso pudimos analizar la situación del paciente desde el aire. La persona que estaba asistiendo al paciente pudo asistirlo de una manera exitosa dentro de los parámetros médicos permitidos y los conocimientos adquiridos en los cursos generados por el médico tutor de la Facultad de Medicina de UMNG. Del mismo modo consideramos que por razones climatológicas para mejorar la comunicación entre la central y la persona que se encuentra acompañando al paciente y el sobrevuelo del Drone cuando se encuentra sobre el paciente.

## 7. CONCLUSIONES

Se logró aportar con una solución oportuna en una situación de emergencia o en un desastre natural. El Drone ambulancia está disponible en el campus de la UMNG, con transporte de equipos, elementos y dispositivos en las situaciones de emergencia. El Drone ambulancia logró reducción de tiempo en cuanto a la respuesta de llegada al lugar de la emergencia en comparación con el equipo médico terrestre. El Drone ambulancia responde en menor tiempo lo cual ayuda a la comunidad ya que dado el gran crecimiento de estudiantes. Nueva aplicación del vehículo no tripulados, ahora para salvar vidas en nuestro campus y más adelante para llegar a aquellas zonas rurales. Se generan nuevas investigaciones para realizar vuelos con Inteligencia Artificial que aprenda de las mejores prácticas.

### Agradecimientos

A la Universidad Militar Nueva Granada, por el apoyo a través del Semillero de Investigación MIZAR. Al Ing. Leonardo Solaque, PhD líder del grupo de investigación GIDAM de la Facultad de Ingeniería de la UMNG por la colaboración, asesoría y pilotaje del Drone.



## REFERENCIAS

- [1] Tipos de (sf). [Tipos de desastres naturales](#). Online [Nov 2017].
- [2] Infante, M & Mojica, A. (2017). Uso de drones en situación de catástrofes como ayuda sanitaria. Revista Electrónica de PortalesMedicos.com.
- [3] Oña, F. (2008). [Grupos de atención prioritaria en la nueva Constitución](#). Red Voltaire. Online [Ene 2018].
- [4] OPS (sf). [Problemas sanitarios comunes a todos los desastres naturales](#) Organización Panamericana de la Salud. Online [Nov 2017].
- [5] Infobae (2017). [Así será el impresionante Drone ambulancia](#). Infobae. Online [Nov 2017].
- [6] Gimeno, L. (2014). [Drone ambulancia para salvar vidas](#). Radio Canadá Internacional. Online [Ene 2018].
- [7] Media Trends (2018). [Este Drone ambulancia salva vidas](#). Online [Dec 2017].
- [8] Momont, A. (2018). [Leveraging drone technology to improve global health](#). Online [Nov 2017].
- [9] Innovaspain. (2018). [UN Colombia desarrollo drones ambulancia para asistir en primeros auxilios](#). Online [Ene 2018].
- [10] DJI (sf). [MATRICE 600 PRO, simply professional performance](#). Online [Nov 2017].
- [11] Puerto, K. (sf). [Matrices 600 es el dron más poderoso de DJI: Lo querrán los cineastas, también en televisión](#). Online [Dec 2017].

# Prototipo de una plataforma tecnológica de soporte de una red social en una comunidad académica: Caso de estudio Politécnico Grancolombiano

Camila A. Gutiérrez L.<sup>1</sup>  
David H. Macías V.<sup>2</sup>  
Javier F. Niño V.<sup>3</sup>  
Politécnico Grancolombiano  
Bogotá – Colombia

Actualmente, es necesaria una actualización de los medios de difusión de información dentro de las universidades, asimismo, es de vital importancia que las instituciones educativas de educación superior conozcan a su comunidad para saber qué ofrecerles y cómo ofrecerlo. Por consiguiente, en el auge de las redes sociales, se propone esta herramienta como un instrumento para trabajar hacia una mejor difusión de información y un mejor conocimiento de las comunidades. Como resultado se realiza la construcción de una plataforma para soportar el desarrollo de una red social que permita integrar varios aspectos presentes en la vida estudiantil de los miembros de la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano, será un prototipo que actuará como generador y fuente de información para conocer el comportamiento y las características de dicha comunidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

El documento que se presenta a continuación evidenciará detalladamente el proceso necesario para el desarrollo del prototipo “Be Part!”, el cual busca generar comunidad y facilitar el día a día en la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano, y así mismo aplicar conocimientos en desarrollo móvil. Esto permite que los diferentes miembros de la comunidad ya mencionada puedan acercarse entre ellos y con la institución. Buscando el cumplimiento de lo propuesto por los miembros del equipo, se plantea el desarrollo de una red social dirigida a los miembros del Politécnico Grancolombiano, la cual sea utilizada como herramienta de difusión de información que a su vez demuestre cómo el conocimiento adquirido en este proyecto permite fortalecer y mejorar conocimientos y competencias como desarrolladores obtenidos durante la carrera universitaria.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Redes sociales

Una red social se define como una red de interacciones sociales que se dan a través de la comunicación entre personas con herramientas como comentarios, mensajes y/o archivos multimedia. Su eje central es el compromiso, generar contacto entre un gran conjunto de personas agrupadas por gustos y pensamientos similares [1] [2] [3] [4]. Detallando esta definición, una red social se puede explicar como una herramienta (usualmente basada en servicios web) que permite a individuos construir su perfil dentro de un sistema limitado que contiene una lista de usuarios (y acceso a ella) de la misma forma como van ingresando y enfatiza en la iniciación o creación de relaciones que se pueden representar en un grafo como las aristas y cada usuario hace de nodo [5] [6] [7] [8] [9]. Algunos casos de éxito de las redes sociales son:

- *Facebook*: Es una red social creada por Mark Zuckerberg que surge como un proyecto que tenía como propósito intercambiar fluidamente información entre los estudiantes de la universidad de Harvard. Gracias a las funcionalidades e innovación de este proyecto fue extendido hasta llegar a cualquier usuario. Fue fundada en 2004 y en 2007 extendió sus idiomas, desde entonces ha marcado las pautas de las diferentes redes sociales existentes. Sus funcionalidades varían dependiendo del tipo de usuario (persona o empresa) y entre ellas se encuentran el registro, la realización de publicación, la creación de eventos, la creación de grupos, mensajería, conexión con aplicaciones externas y juegos. [10]
- *StudentLife Network*: Es un red gratuita y privada dirigida a estudiantes universitarios en Canadá, la cual ofrece un espacio de comunicación e interacción entre los diferentes usuarios a través de 4 grandes herramientas: Las campañas son creadas por los diferentes asociados a esta red para premiar a usuarios dentro de esta red con incentivos monetarios, de viaje, entre otros. En la sección de laboratorios, se crean espacios para comprobar o desmentir mitos pertenecientes a la vida estudiantil. En el blog se pueden encontrar varios artículos sobre temas variados pero dirigidos a contribuir a la vida y el trayecto estudiantil. Como última herramienta, cuentan con un banco de conocimiento, el cual contiene una gran oferta de información sobre guías, consejos y soporte en cualquier aspecto estudiantil que el usuario requiera. [11]
- *MSOE Bridge*: Es una red social creada en conjunto entre la escuela de ingeniería de Milwaukee y 7Summits, dirigida a los aspirantes para realizar todos los procesos de admisión en línea. Cuenta con funciones específicas como conocer sobre la universidad, llenar el formulario de admisión, realizar el seguimiento de su aplicación e

<sup>1</sup> cagutierrez2@poligran.edu.co

<sup>2</sup> mdavidhernando@yahoo.es

<sup>3</sup> jninoel@poligran.edu.co

interactuar con el consejero de admisiones, con aspirantes y con estudiantes que se encuentren ya inscritos en la universidad. [12]

- *Phoenix Connect*: Se define como una red social académica (privada) creada por la universidad de Phoenix dirigida a los diferentes miembros de su comunidad como estudiantes, administrativos, miembros de las facultades, entre otros. Busca crear comunidad entre el usuario y miembros de la red que puedan guiarlo sobre la realidad de su campo de interés, sobre sus intereses personales y metas reales de la elección de carrera profesional. [13]
- *Penn Foster*: Es una red social dirigida a los estudiantes de la modalidad virtual de los programas académicos ofrecidos por la institución educativa Penn Foster, que contiene en su mayoría artículos sobre la vida estudiantil, es decir, contiene artículos variados sobre temas como el bachillerato, la orientación vocacional, el balance de actividades y noticias de interés común. [14]

## 2.2 Desarrollo móvil

Una aplicación desarrollada para móviles busca aprovechar al máximo los componentes de este tipo de dispositivos, como los sensores; para este aprovechamiento es necesario desarrollar una aplicación nativa, la cual está dirigida a un sistema operativo específico para un acceso completo del desarrollador y una mejor experiencia para el usuario. [15] [16]. En este caso el sistema operativo a aprovechar es Android, este se encuentra basado en Linux y es desarrollado por la Open Handset Alliance liderada por Google, enfocado para ser utilizado en dispositivos móviles como tabletas, Google TV y celulares. Su estructura está compuesta por aplicaciones que se ejecutan en un Framework de Java con aplicaciones orientadas a objetos sobre la biblioteca de Java y sus bibliotecas están escritas en lenguaje C con un acceso totalmente abierto al desarrollador. [17] [18]

Para el entorno de desarrollo se decide utilizar la herramienta de Android Studio en su versión más reciente 3.1.1, esta herramienta desarrollada por Google y basada en IntelliJ IDEA da al usuario herramientas que permiten agilidad en la construcción de aplicaciones móviles. Contiene una amplia gama de componentes, herramientas y plugins que permiten crear una aplicación completa y agradable para el usuario de esta. La estructura general de un proyecto se define por 4 componentes: el sistema de compilación basado en Gradle, la carpeta “manifest” la cual contiene el archivo de tipo XML que contiene la configuración general, la carpeta “java” que contiene todos los archivos de código fuente de Java y la carpeta “res” que contiene todos los recursos como los archivos multimedia y los archivos XML. [19]

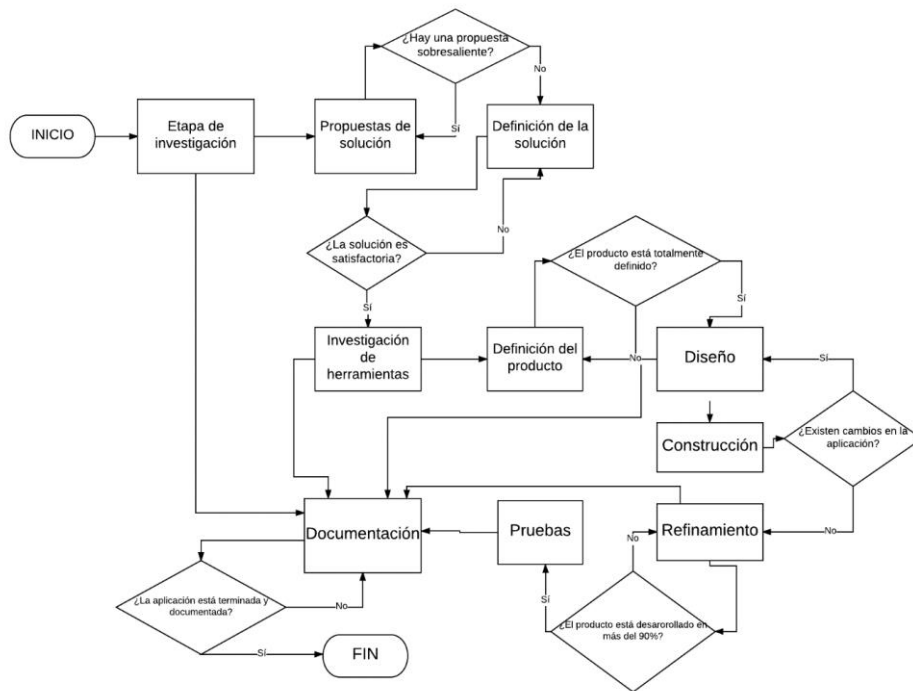
Debido a las limitaciones previamente nombradas sobre infraestructura, la herramienta utilizada para este aspecto es Firebase. Es una consola, un conjunto de herramientas que fue adquirida por Google en 2014 orientada a la creación de aplicaciones web y móviles que utiliza la infraestructura de Google y ofrece herramientas como la autenticación, la base de datos, el almacenamiento de archivos multimedia y la realización de pruebas; cada una de estas herramientas funciona bien por sí sola, y esta plataforma hace de panel unificado para su integración. [20]

## 3. MÉTODO

Dada la cantidad de personas y el tiempo asignado, se decide manejar una metodología propia que cuenta con 10 etapas las cuales serán detalladas en los siguientes párrafos y que se nombran a continuación: investigación, propuestas de solución, definición de la solución, investigación de herramientas, definición del producto, diseño, construcción, refinamiento, pruebas y documentación. Claro está, no son etapas estrictamente en cascada, algunas etapas llegan a mezclarse y complementarse a lo largo del proyecto.

La primera etapa es la de investigación, en la cual se realizó una búsqueda a modo de estado del arte de las redes sociales, una encuesta para conocer preferencias de las personas pertenecientes a la comunidad del Politécnico Grancolombiano en cuanto al uso de éstas y referencias de redes sociales en espacios académicos. En la segunda etapa, se realizó la definición de propuestas las cuales se plantearon en cuanto al tipo de dispositivo, objetivo y tipo de aplicación en donde resultaron las siguientes opciones:

- Computador: una aplicación web que funcione como una red social.
- Computador: una aplicación web que funcione como una red social con compatibilidad en dispositivos móviles (híbrida).
- Dispositivos móviles: aplicación nativa (red social) dirigida a cualquier dispositivo móvil.
- Dispositivos móviles: aplicación nativa (red social) dirigida a dispositivos móviles que cuentan con sistema operativo Android.
- Los criterios de decisión fueron: solución con mayor alcance, solución más viable y solución más influyente. Por último, se definió cuál sería el enfoque y el público objetivo principal de la aplicación. En la tercera etapa que fue la definición de la solución se tuvo en cuenta los resultados obtenidos en la etapa de investigación, el análisis evidenció que la red social tendría una mejor acogida en dispositivos móviles con sistema operativo Android, por lo tanto, se encontró que esta propuesta tendría un mayor impacto, alcance y viabilidad. Por todo esto, se definió como solución un prototipo de red social con esas características específicas.



**Figura 23.** Diagrama de flujo de la metodología del proyecto

La investigación de herramientas fue la cuarta etapa en la cual se encontraron unas herramientas enfocadas en el desarrollo para dispositivos móviles: un IDE oficial que es Android Studio que permite crear la vista y funcionalidad de la aplicación además de manejar los requerimientos de los dispositivos como permisos y versiones del sistema operativo. También se encuentra una plataforma para el desarrollo de aplicaciones móviles y gestión de infraestructura, Firebase, la cual funciona como panel integrador de varios componentes.

En la quinta etapa se define el producto a construir, el cual se delimita a una aplicación móvil evidenciada en una red social que interactúe con los usuarios y les permita formar relaciones y tener comunicación entre sí, además de algunas funcionalidades específicas para las personas que pertenecen a la comunidad de la IUPG. Cuenta con especificaciones como el sistema operativo (Android) en el rango de versiones desde la 4.4.4 hasta la más reciente (8.0 Oreo). En la sexta etapa, la de diseño, se estableció un diseño principal de vista en la que fuese intuitiva la forma de explorar la aplicación por medio de íconos y etiquetas, esta etapa de la metodología se divide en 2 procesos: El primer proceso de diseño inicial, cuenta con ciertas vistas definidas (actividades) a crear, con íconos tomados de varias fuentes de internet para generar una vista preliminar de la aplicación. Para la segunda etapa se definen y crean los íconos necesarios para cada sección, generando un estándar visual de la red social.

En la etapa número siete identificada como la etapa de construcción, se inicia la construcción de las vistas con los íconos estandarizados y se estiliza la aplicación a lo previamente diseñado. Para la sección de infraestructura, se establecieron las colecciones a crear y utilizar para el correcto funcionamiento de la aplicación, definiendo un modelo de datos no relacional. En el desarrollo se establecieron prioridades en la construcción de las funcionalidades, iniciando con las funciones de la autenticación (registro, login y cerrar sesión), siguiendo con las funciones locales como la calculadora para continuar con el almacenamiento y la extracción de toda la información en la base de datos; por último, se agregan las funcionalidades faltantes que se encargan de mostrar la información actualizada en toda la aplicación.

En la etapa de refinamiento que es la octava, se arreglan errores previamente detectados para finalizar algunas funcionalidades. El paso siguiente se enfoca en implementar estructuras para fines de visualización, para poder pasar parámetros entre clases y generar la interacción entre usuarios; disminuyendo su consumo de memoria, mejorando su fluidez y aumentando su velocidad de ejecución.

En la penúltima etapa, que es la de pruebas, teniendo en cuenta que se realiza un prototipo, las pruebas se realizaron con el usuario directamente; es decir, la aplicación fue entregada a diferentes miembros de la comunidad de la IUPG acompañada de una encuesta sobre el rendimiento y funcionalidades de la aplicación. A pesar de ser la última etapa en ser nombrada, la etapa de documentación se realizó en conjunto con varias etapas; en este proceso en específico se realizó en primera instancia el almacenamiento de las posibles referencias a utilizar, a continuación, se estableció el planteamiento del problema y la definición de los objetivos. Siguiendo con este proceso, se crearon los diagramas y el modelado de todos los componentes de la aplicación para plasmarlos en el documento y así en conjunto con la realización de cada etapa previa, se complementaba esta etapa de documentación. Sin embargo, tomó un mayor grado de importancia en la finalización del proyecto, ya que era necesario la construcción del documento para validar todo el proceso.

## 4. RED SOCIAL

### 4.1 Modelo de datos

Dado que es un modelo sobre una base de datos no relacional, los datos están modelados en un formato JSON, tal como se muestra en las Figuras 2 a 5.

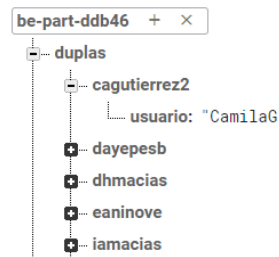


Figura 24. Modelo de datos – duplas



Figura 25. Modelo datos – nombres

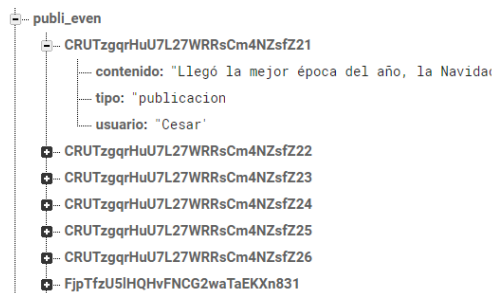


Figura 26. Modelo datos - publicaciones y eventos



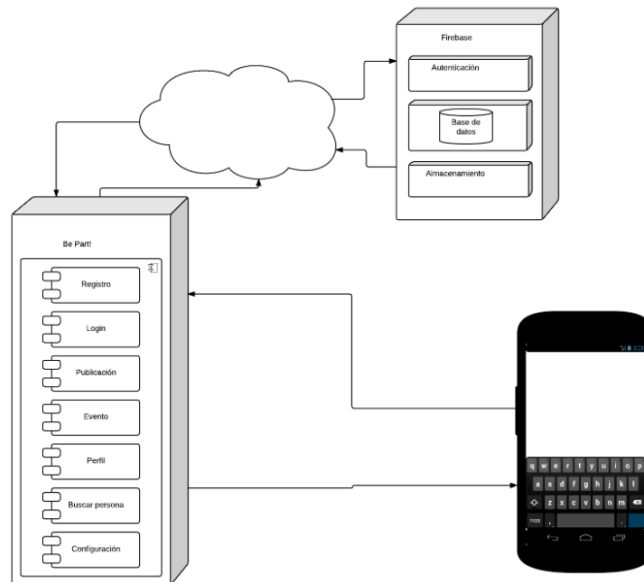
Figura 27. Modelo datos – usuarios

### 4.2 Modelo de infraestructura

La infraestructura está definida en Firebase, plataforma de la cual se toman tres herramientas en específico para aplicar al proyecto de la siguiente manera:

- Autenticación: esta herramienta es la encargada de realizar las funciones de autenticación como lo son el registro que realiza con el correo y la contraseña, el login que realiza con el correo y la contraseña y por último se encarga de cerrar la sesión del usuario.
- Base de datos en tiempo real: en esta herramienta se almacena la estructura JSON previamente descrita en el modelo de datos. Adicionalmente, se encarga de actualizar los registros en tiempo real y dar acceso a estos.
- Almacenamiento: en este apartado se encuentran los archivos multimedia, en este caso ficheros de imágenes clasificados en fotos de perfil y fotos de los eventos; permite estructurar el almacenamiento de estos archivos y así mismo facilitar el acceso y visualización de estos.

En la Figura 6 se observa el diagrama de despliegue.



**Figura 28.** Diagrama de despliegue

### 4.3 Modelo de la aplicación

Las funcionalidades del modelo son:

1. Login: este módulo permite el ingreso del usuario a la aplicación, da paso al módulo de registro y al de recordar contraseña. Se encarga de comprobar que el usuario exista en la base de datos y que la contraseña que ingresa sea la misma que la almacenada, también es la que define la vista que ve como principal el usuario dependiendo del estado de su sesión.
2. Registro: es el módulo encargado de realizar la creación del usuario dentro de la aplicación, define el rol del usuario y almacena datos claves como el usuario (que actuará de llave para todos los módulos mientras la sesión esté abierta), el correo institucional y la contraseña. Da paso al módulo de diligenciar información.
3. Diligenciar información: en este espacio, que es la continuación del registro, se diligencia información del usuario (alguna obligatoria y otra opcional) la cual permite generar detalle sobre cada usuario existente dentro de la aplicación. Da paso a la vista del Login para validar el usuario recién creado.
4. Principal: este módulo cuenta con una gran gama de funcionalidades.
  - Barra de íconos. Esta barra contiene íconos que funcionan como botones para dirigir al usuario a las diferentes vistas de la aplicación.
  - Foto. Se encarga de mostrar la foto de perfil establecida por el usuario y existente en la base de datos.
  - Botones. Los tres botones grises que se encuentran aquí, permiten ir al perfil (publicación), a eventos (evento) o actualizar el listado de publicaciones y eventos existentes dentro de la aplicación.
  - Acelerómetro. Permite realizar un breve juego de "Piedra, papel o tijera" con otros usuarios por medio de la acción de agitar el dispositivo.
5. Crear evento: en este módulo se realizan dos acciones, la primera acción es la creación de un evento con la posibilidad de ingresar detalles y la segunda acción es poder ver el listado de los eventos del usuario que actualmente navega en la aplicación.
6. Ver evento: aquí se permite ver los detalles del evento seleccionado en el listado de la vista principal.
7. Calculadora: esta vista permite calcular la nota necesaria en el tercer corte de un usuario basada en una nota deseada y las notas (reales o imaginarias) de los 2 primeros cortes.

8. **Buscar personas:** este módulo se encarga de arrojar una lista de posibles usuarios, basado en la letra o palabra ingresada por el usuario y en la información existente en la base de datos, también lleva al usuario actual a visitar el perfil del usuario seleccionado de la lista.
9. **Perfil:**
  - **Visualización.** Se muestra una lista con las publicaciones del perfil al que se hace referencia junto con su información básica tal como la foto de perfil, el nombre del usuario, y el apartado que indica si el usuario está en la universidad.
  - **Publicar.** Si se encuentra en el perfil propio el usuario puede realizar una publicación que contenga texto.
  - **Horario.** Dirige la aplicación a la vista de horario.
  - **Información.** Dirige a la información del usuario al que pertenece el perfil que se está viendo.
  - **Materias.** Dirige a la lista de materias que ha visto el usuario al que pertenece el perfil.
10. **Información:** permite acceder a la información suministrada por el usuario y editada por el mismo, esta información es visible para todos.
11. **Horario:** muestra una lista de clases que el usuario ingresó a la base de datos mostrando el día de la semana, horas de inicio y de fin, docente y lugar de la clase.
12. **Agregar clase:** agrega la clase a la base de datos para que puedan ser visibles en el horario.
13. **Agregar materia:**
  - **Visualización.** Se muestra una lista de materias agregadas en la base de datos conteniendo el nombre de la materia, la nota y el nombre del docente que la dictó.
  - **Agregar.** Cuando se diligencien los campos requeridos y se oprima el botón (+): la materia se registrará en la base de datos y en la lista de materias vistas.
14. **Cerrar sesión:** cierra la sesión actual y dirige la aplicación a Login.

## 5. RESULTADOS

El proyecto presentado en este documento tenía como alcance diseñar y construir el prototipo de una plataforma de red social, por lo tanto, la metodología y los modelos introducidos en las secciones anteriores deben ser identificados como los resultados del proyecto. La prueba de la ejecución completa del proceso de prototipado es el registro de software ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor. Adicionalmente, existen algunos resultados intermedios, como las cifras arrojadas por las encuestas, que apoyaron procesos de toma de decisión respecto a la tecnología y los medios a utilizar. Los resultados fueron los esperados. No obstante, después de analizarlos, se evidencia que existen oportunidades de mejora del prototipo como añadir funciones específicas para cada rol y persona. Un proyecto distinto, que iniciará próximamente, buscaría propagar la adopción y uso de la aplicación que hace parte del primer proyecto. Este último proyecto aún no cuenta con resultados y por ello es imposible calificar el impacto del prototipo sobre la comunidad educativa.

## 6. CONCLUSIONES

Es importante destacar el aprendizaje obtenido durante el desarrollo del proyecto ya que se logra completar el prototipo propuesto con una cantidad considerable de obstáculos, fracasos y éxitos. En cuanto a lo propuesto inicialmente, se logran identificar necesidades que no son evidentes en la comunidad a tratar para poder implementar en la aplicación, se crea una red social que exitosamente conecta a las personas que se encuentran en ella y además se profundiza en el conocimiento pertinente al campo de desarrollo móvil; estos resultados permiten obtener las conclusiones que se presentarán a continuación.

Primero, se concluye que las redes sociales son un medio para resolver necesidades cotidianas, sin importar el tipo de comunidad que agreguen. Para el caso concreto de estudio, facilitan la inclusión de la gran mayoría de los actores y la propagación de la información.

Adicionalmente, se comprobó que las redes sociales no tienen un alto índice de competencia entre sí; por lo tanto, una red social de propósito dedicado como la propuesta tendría cabida dentro de la comunidad objetivo.

Por último, la construcción de la herramienta diseñada demandó el uso de una herramienta multi-función que gestionara apropiadamente la información y que la tuviese disponible en todo momento. Un desarrollo a mayor escala implicaría una inversión significativa para acceder a una mayor capacidad de almacenamiento y poder de cómputo.

## REFERENCIAS

- [1] Android Developers (sf). [Documentation](#). Online [Aug 2017].
- [2] Mashable (sf). [Build a Private Social Network for Your College With Student Life Network](#). Online [Sept 2017].
- [3] Universidad Politécnica de Madrid (sf). [Metodología de desarrollo ágil para sistemas móviles](#). Online [Sept 2017].
- [4] Journal of Computer-Mediated Communication (sf). [Social Network Sites: Definition, History, and Scholarship](#). Online [Sept 2017].
- [5] Huffpost (sf). [Social Media vs. Social Networking](#). Online [2017]
- [6] Cambridge University (sf). [Social network](#). Online [Sept 2017].
- [7] InformationWeek IT Network (sf). [Universities Create Their Own Social Networks For Students](#). Online [Sept 2017].
- [8] TechTarget (sf). [Desarrollo de aplicaciones móviles](#). Online [Sept 2017]
- [9] Google Developers (sf). [TFC Desarrollo de Aplicaciones Móviles](#). Online [Aug 2017].
- [10] Google Developers Firebase (sf). [Documentación Firebase](#). Online [Oct 2017]
- [11] History Cooperative (sf). [The History of Social Media: Social Networking Evolution!](#) Online [Sept 2017].
- [12] LanceTalent (sf). [Los 3 Tipos De Aplicaciones Móviles: Ventajas E Inconvenientes](#). Online [Sept 2017].
- [13] Blog Marketing Digital, Social Media y Transformación Digital (sf). [Estadísticas de redes sociales 2018: Usuarios de Facebook, Twitter, Instagram, YouTube, LinkedIn, Whatsapp y otros](#). Online [Sept 2017].
- [14] MSOE University (sf). [MSOEs new Bridge](#). Online [Oct 2017].
- [15] Oxford University Press (sf). [Social Network Definition](#). Online [Sept 2017]
- [16] Penn Foster (sf). [Student Life Blog](#). Online [Sept 2017]
- [17] Definición.de (sf). [Definición de Facebook](#). Online [Sept 2017]
- [18] StudentLife Network (sf). [StudentLife Network](#). Online [Sept 2017].
- [19] University of Phoenix (sf). [Be social with PhoenixConnect](#). Online [Sept 2017].
- [20] Easley, D. & Kleinberg, J. (2010). *Networks, Crowds and Markets: Reasoning about a Highly Connected World*. Cambridge University Press.
- [21] Jackson, M. (2008). *Social and Economic Networks*. Princeton University Press.
- [22] Newman, M. (2010). *Networks: An introduction*. Oxford University Press.
- [23] Wasserman, S. & Faust, K. (1994). *Social network analysis*. Cambridge University Press.



Karen S. Sierra G.<sup>1</sup>

Oscar A. Fajardo C.<sup>2</sup>

Ricardo Ceballos G.<sup>3</sup>

Fundación Universitaria San Mateo  
Bogotá – Colombia

En este proyecto se hace un análisis a propósito de la evaluación y gestión de riesgos para el desarrollo de proyectos de obras civiles para redes de Fibra Óptica (FO), teniendo en cuenta la normativa legal para la prevención de riesgos laborales. Se relacionan las condiciones previas al tendido de la fibra: así como las condiciones del área de trabajo, con los equipos tanto para realizar la labor como para la seguridad del personal técnico, lo que incluye tanto señalización, despeje de la zona de trabajo, como también los elementos de protección personal con los que debe contar el trabajador, entre otros. En la investigación se presentan procedimientos relacionados con la prevención de accidentes laborales en relación con los tendidos de fibra óptica en redes externas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las obras civiles generalmente aportan a la estructuración del territorio, éstas contribuyen al desarrollo de infraestructuras para la población. Por lo cual la sociedad se beneficia directamente de una obra civil, estas obras como lo refiere su nombre no se podrían ejecutar sin el valioso trabajo del ser humano en su etapa de construcción, ya que antes del evento de ejecución de una obra civil se debieron haber realizado previamente diferentes estudios ya sean a nivel técnico o social entre muchos otros, por lo tanto en la realización de la construcción de la obra civil y en este caso en el desarrollo de proyectos de obras civiles para redes de (FO) nos enfocamos en el tema de la gestión de riesgos, en el cual entran subtemas como el análisis y la evaluación de los riesgos, que conllevan la construcción de estas obras las cuales van directamente relacionados con el bienestar y la seguridad del trabajador y demás personas que de una u otra forma resulten involucradas en el proceso.

Hoy en día la prevención de accidentes laborales tanto para los colaboradores como para las empresas ha sido un tema que va en desarrollo y con gran importancia no sin antes mencionar que en Colombia ya se expidió la ley 1562 de 2012 en el artículo 01 en el cual ya es de carácter obligatorio que las organizaciones tengan estructurado un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), con lo cual a las empresas les ha tocado empaparse del tema en los últimos años para no ser acreedores de sanciones tanto económicas y/o administrativas por parte de las entidades del estado encargadas de este tema. El (SG-SST) Tiene el objetivo de mejorar las condiciones laborales y el ambiente en el trabajo, además de la salud en el trabajo, que conlleva la promoción del mantenimiento del bienestar físico, mental y social de los empleados [17].

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Evaluación de riesgos

Los métodos de evaluación de riesgos vienen usándose desde hace varias décadas, tanto por obligación legislativa, como por motivos técnicos. Los sistemas de evaluación de riesgos han sido fusionados al estudio de la fiabilidad de los sistemas, los subsistemas y los componentes, además del estudio del comportamiento humano, siendo su objetivo fundamental anticiparse a los posibles sucesos no deseados, con el fin de tomar las medidas oportunas previamente [1]. La Dirección General V. Empleo, Relaciones Laborales y Asuntos Sociales de la Comisión Europea, en su documento indica una serie de pasos los cuales serán de vital importancia para evitar accidentes en el lugar de trabajo [2].

### 2.2 Tipos de Fibra Óptica

- Fibra monomodo: Es una fibra óptica en la cual se propaga un modo de luz, este tipo de fibra permite alcanzar grandes distancias.
- Fibra multimodo: En este tipo de fibra la luz se propaga por varios caminos los cuales llegaran todos a su vez, son usadas en distancias menores a 2 Km.
- Fibra con salto de índice: La tensión del núcleo se mantiene constante al variar la distancia desde el centro de la fibra al interior.
- Fibra con variación de índice: La tensión varía, al ampliar la longitud que inicia en el centro de la fibra hasta el exterior [31].

---

<sup>1</sup> [kssierra@sanmateo.edu.co](mailto:kssierra@sanmateo.edu.co)

<sup>2</sup> [osc1032385099@sanmateo.edu.co](mailto:osc1032385099@sanmateo.edu.co)

<sup>3</sup> [rceballos@sanmateo.edu.co](mailto:rceballos@sanmateo.edu.co)

### 3. TENDIDO

#### 3.1 Aéreo

Los tendidos aéreos en muchas ocasiones suelen aprovechar las redes existentes que en su gran mayoría son de cableado eléctrico, para realizar sus anclajes en algunos sectores se hace necesario el pago de un arrendamiento por la utilización de esta infraestructura.



Figura 1. Redes de FO en exteriores [3]

#### 3.2 Terrestre

El tendido de cable (Figura 2) es la acción que es ejecutada por el personal técnico con las protecciones y medidas propias de su labor para que el cable de FO llegue a su destino el cual puede realizarse por varios métodos luego de una debida visita técnica de factibilidad.



Figura 2. Tendido de FO terrestre [4]

Una de las técnicas más tradicionales es halar la FO (Figura 3), al hacerlo, la fibra especialmente en las curvas, tendrá alta fricción, pero hoy en día ya se reduce esta tensión con lubricantes, además existen diferentes técnicas, por ejemplo, existe una técnica en la que generan corriente de aire con mucha presión que impulsa el cable mientras se va instalando. Con esta técnica se puede instalar fibra en distancias mayores. A continuación, se relacionan 4 formas de realizar el tendido de la fibra óptica [5].

- Aprovechar una canalización existente.
- Tendidos Aéreos.
- Tendido por Fachadas.
- Realizando una obra civil.



Figura 3. Tendido de FO terrestre [6]

#### 4. MÉTODOS DE MEDICIÓN FO

Para realizar medición en fibra óptica existen los siguientes métodos:

- Test de continuidad de extremo a extremo: básicamente el análisis que realiza este test es verificar que las puntas y conectores utilizados en la FO funcionen de manera óptima.
- Test de fallas: verifica la existencia de algún tipo de imperfección en el tramo de fibra que va ser utilizado.
- Medición de potencia: Se mide la potencia de la fibra para asegurar que sea la suficiente como para diferenciarse del ruido y no saturar el receptor. Esto se puede medir con el dispositivo llamado medidor de potencia.
- Medición de pérdidas de potencia: es la diferencia entre la potencia que se transmite y la que se recibe [38] (Figura 4).



Figura 4. Instrumento de medición en FO [7]

#### 5. SEGURIDAD

El personal que se desempeña en la instalación y/o reparación de cables de FO están siempre expuestos a luz láser por lo tanto están propensos a sufrir de irregularidades persistentes en la visión. Los trabajadores están siempre expuestos a ser penetrados en su cuerpo (piel y ojos), por pequeñas partículas de la FO, también pueden inhalarla o ingerirla. Otro riesgo al que se exponen estos trabajadores de FO es de incendio debido a que están en presencia de materiales incendiables en las zonas de instalación de láser de gran magnitud. A continuación, se nombran algunas recomendaciones que ayudan a prevenir, minimizar y vigilar las lesiones que abarca este oficio:

- Capacitación continua al personal técnico en el manejo de fibras ópticas.
- Gestionar procedimientos de seguridad al hacer uso de luz láser y de manipulación de FO, que incorporen:
  - No hacer usos de luces láser antes del inicio de las labores.
  - Uso de gafas protectoras contra láser en la instalación de trabajos con fibra óptica.
  - Prohibir la mirada directamente en el láser de la punta final de la FO o que ésta sea apuntada a otra persona.
  - Instalación de letreros de precaución y carteles en áreas en las que existe exposición a la radiación láser, y velar que la iluminación ambiental sea suficiente para no tener en cuenta la pérdida de visibilidad que ocasionan las gafas protectoras.
  - Vigilar el área de trabajo para diagnosticar si existen materiales inflamables antes de la instalación de luces láser de alta intensidad [34].



Figura 5. Implementos de seguridad en instalación de FO [8]

## 5.1 Seguridad ocular



**Figura 6.** Seguridad en instalación de FO [9]

La luz de una fibra óptica, puede causar daños serios en la visión incluso si ésta no se puede ver. Se deben apagar con anticipación al comienzo del trabajo todas las fuentes de luz encendidas. No es recomendable ver directamente las puntas de la fibra ya que puede tener láser y tampoco apuntarlas a otra persona, mucho menos en el rostro. Un láser puede ser riesgoso si posee alguno de estas tres situaciones:

- Longitud de onda: Esta depende del material utilizado con que este compuesto para generar dicho haz de luz.
- Salida del haz láser (o tiempo de exposición): Se divide en onda continua o tren de impulsos.
- Y potencia (o energía del haz): En los láseres continuos la potencia se caracteriza por ser máxima en su salida la cual se mide en vatios, y en los láseres de impulsos se caracteriza por su energía total por pulso la cual se mide en Julios.

En la norma UNE en 60825 se puede verificar la distribución de los láseres y los riesgos que conllevan.

- Clase 1: Productos láser que proveen seguridad en todas sus condiciones de manipulación visibles, incorporando el uso de dispositivos ópticos con visión directa, los cuales están clasificados de la siguiente forma [33]:
  1. Son inseguros cuando se les ve a través de dispositivos ópticos como microscopios o lupas.
  2. Láseres visibles (400 a 700 nm). Los reflejos de parpadeos proporcionan protección al ojo aunque para ello utilicen instrumentos ópticos.
- Clase 2: Cuando se utilizan instrumentos ópticos que no son seguros, dentro de esta clase están:
  - 3R: láseres en los que mirarlos directamente es peligroso pero no es riesgo mayor.
  - 3B: Productos láser cuya visión directa es peligrosa.
  - 4: Son productos láser que tienen una potencia máxima, recordemos que mirarlos directamente es peligroso ya que llegan a causar daños en la piel y pueden llegar a ser considerados como un peligro de incendio. Debe manipularse con extrema precaución [23].

## 6. RIESGO DEL TRABAJADOR

Los trabajos que tiene el trabajador de alturas se denominan como de alto riesgo y son los superiores a los 2 m sobre la superficie (trabajos verticales). Antes de realizar labores relacionadas con este tipo de trabajo las empresas y la ley exigen que se cuente con un permiso y una capacitación de trabajo en alturas donde se especifique la ubicación y el tipo de labor a realizar [36]. Entre los riesgos de esta labor se encuentran la caída de objetos y de personas, lesiones severas, y hasta muertes. Existen factores de riesgo humano y de materiales donde se encuentran, por ejemplo, físicas, psicológicas, de formación; y equipos de protección personal, orden y aseo y factores ambientales.

### 6.1 Herramientas y equipos de seguridad en el área de las Telecomunicaciones tipo aéreo y terrestre

- Punto de anclaje.
- línea de conexión.
- Arnés de seguridad de cuerpo completo de tres argollas con línea debida.
- Dispositivo de anclaje.
- Casco.
- Línea de posicionamiento.
- Arrestador.

- Mosquetón.
- Guantes.
- Lentes de seguridad con protección.
- Calzado de seguridad.
- Bloqueador solar.

Los trabajadores de este sector siempre están expuestos a riesgos por ello deben contar con todos y los mejores elementos de protección personal que se requieren e identificar los diferentes riesgos que se pueden presentar en el área o lugar de trabajo así como también el estado en el que se encuentren todos estos incluyendo las herramientas necesarias para realizarlo. Algunos aspectos a tener en cuenta:

- Estructura.
- Condiciones ambientales.
- Condiciones del trabajador.
- Equipos en perfecto estado y funcionamiento.
- Condiciones de los puntos de anclaje.
- Tipos de labores a desarrollar.

El análisis de los equipos así como de su correcto funcionamiento será clave para disminuir la posibilidad de accidentes; la empresa debe comprar los mejores elementos de protección y es recomendable el acompañamiento de personal capacitado en la compra de equipos (Figura 7). Se pueden presentar diferentes riesgos entre ellos también se encuentran las condiciones ambientales:

- Si el trabajo es en clima cálido el trabajador perderá líquidos y electrolitos por efecto del sudor, y deberá reponerlos consumir bebidas que hidraten de nuevo el organismo antes y después de realizar labores.
- Si se trata de exposición a los rayos solares, esta deberá contrarrestarse con bloqueadores aplicados antes de comenzar la labor y también con gafas de seguridad con protección UV y polarización [37].



**Figura 7.** Señales de uso de equipo de protección personal [11]

Para la mayoría de cortadoras que son usadas para realizar los empalmes y terminar los conectores de empalmes pre-pulidos que sostienen la fibra luego de ser abierta, se recomienda realizar una recolección de restos de fibra para luego ser sellados y que sean desechados de la forma más apropiada (Figura 8). Existen diferentes formas de hacer esta recolección, una de ellas es con un paño de plástico negro para la superficie de trabajo.



**Figura 8.** Normas de seguridad de FO [12]

## 6.2 Normas de seguridad para la instalación de Fibra Óptica

Enseguida se nombran algunas de las normas para aplicar en el área de trabajo para que sean ejecutadas por técnicos en fibra óptica, las cuales deben ser tenidas en cuenta:

- Realizar las labores en un área de color negro específicamente ya que esto facilita la búsqueda de sobrantes de la FO.
- Portar overoles o ropa desechable ya que las partículas de la FO en la ropa pueden mudar a la comida y ser ingeridas.

- Siempre utilizar gafas con protección lateral y guantes protectores.
- Aunque ya se había mencionado anteriormente, no ver las puntas de la FO sin estar completamente seguro de que no está emitiendo luz, para esto se puede manipular un medidor de potencia óptico.
- Trabajar en áreas que cuenten con ventilación.
- Para el trabajador que debe usar lentes de contacto no tener contacto con ellos hasta finalizar la labor y tener las manos lavadas.
- Los aparatos y/o materiales combustibles deben permanecer lejos de los aparatos eléctricos.
- Todos los sobrantes o restos de la FO deben colocarse en un contenedor clasificado adecuadamente como residuos.
- Asear adecuadamente toda el área de trabajo una vez finalizado, tampoco se debe fumar.
- No se debe comer ni tomar bebidas en el área de trabajo. El trabajador puede llegar a sufrir hemorragias internas si los fragmentos de fibra son ingeridos [35].

## 7. ISO 31000 - GESTIÓN DE RIESGOS

ISO 31000 de 2009 (International Organization for Standardization) señala un gran número de normas familiarizadas con la gestión del riesgo. El objetivo de la norma es dar a conocer un conjunto de principios y directrices para que la gestión de riesgos y su proceso en cada organización sean efectivos en la disminución de accidentes laborales. Esta norma incorpora:

- Norma ISO 31000:2009 - gestión de riesgos - principios e instrucciones.
- Norma ISO/IEC 311010 - gestión de riesgos - valoración del riesgo.
- Norma ISO Guide 73:2009 - gestión de riesgos- vocabulario Gestión.

La norma ISO 31000 de 2009 lo que desea es aplicar y adaptar al público, comunidad o empresas en general los principios sobre gestión de riesgos (Figura 9). Esta norma no es certificable, ya que más bien aporta auténticas directrices para la implementación de una mejor cultura organizacional siendo un gran aporte para el método de gestión ISO 9001 de 2015 [13].



Figura 9. Normas de seguridad de FO [14]

## 8. CONCLUSIONES

En este tipo de labor existen riesgos para la salud, la seguridad y en algunas actividades el medio ambiente, para esto en cada organización existe el área que tiene en su poder el SG-SST (sistema de seguridad y salud en el trabajo) el cual entre otras cosas, se encarga de recopilar, gestionar, solucionar y dar a conocer a los empleados las buenas prácticas y las normas y riesgos que deben conocer para disminuir en las labores asignadas el riesgo de accidentes. Todo esto se ha logrado en un mayor porcentaje en cada organización debido a la introducción de la norma ISO 31000, la cual las empresas han venido incorporando.

Las empresas del sector decidieron reunirse para analizar las problemáticas más comunes relacionadas con riesgos Profesionales. Allí encontraron preocupaciones semejantes sin solución y desafíos que en forma individual simbolizaban tareas complejas de llevar a cabo.

Decidieron entonces conjuntamente realizar algo al respecto, algo que facilitara los procesos ya implementados dirigidos a la prevención de riesgos laborales en las organizaciones. De ahí nació la voluntad de trabajar, contribuyeron entonces con recursos, voluntad y experiencia, para construir estrategias y programas que fueran de gran utilidad para contribuir a la disminución de riesgos en los diferentes sectores.

## REFERENCIAS

- [1] Rubio, J. (2004). Métodos de evaluación de riesgos laborales. Ediciones Díaz de Santos.
- [2] Rubio, J. (2004). Métodos de evaluación de riesgos laborales. Ediciones Díaz de Santos.
- [3] MicroZanjas (sf). [Tendidos de fibra óptica: Tipos, características, ventajas e inconvenientes](#). Online [Dic 2017].
- [4] Act Telemática (2018). Tendido de FO terrestre. Tomado en terreno técnicos de la empresa ACT Telemática.
- [5] Cecilia, A., Lucas, C. & Margarita, M. (2010). [Tendido y Verificación de Redes de Fibra Óptica](#). Online [Dic 2017].
- [6] MicroZanjas (sf). [Tendidos de fibra óptica: Tipos, características, ventajas e inconvenientes](#). Online [Dic 2017].
- [7] Act Telemática (2018). Tendido de FO terrestre. Tomado en terreno técnicos de la empresa ACT Telemática.
- [8] Flike Networks. [OTDR-Instrumento de medición en FO](#). Fluke Networks. Online [Dic 2017].
- [9] Tagua, J. (2011). [Certificación, análisis y reparación de redes de datos de acuerdo a los estándares TIA/ISO en cobre y fibra óptica](#). IES Gonzalo Nazareno.
- [10] Trinchera Online (2017). [Claro apuesta por atención de calidad](#). Online [Nov 2017].
- [11] [Imagen señales de uso de equipo de protección personal](#). Online [Dic 2017].
- [12] [Normas de seguridad de FO](#). Online [Dic 2017].
- [13] [Imagen normas de seguridad de FO](#). Online [Dic 2017].
- [14] Cecilia, A., Lucas, C. & Margarita, M. (2007). [Tendido y Verificación de Redes de Fibra Óptica](#). Online [Dic 2017].
- [15] Cecilia, A., Lucas, C. & Margarita, M. (2007). [Tendido y Verificación de Redes de Fibra Óptica](#). Online [Dic 2017].
- [16] The Fiber Optic Association (2014). [Guide to Fiber Optics & Premises Cabling](#). Online [Dic 2017].
- [17] The Fiber Optic Association (2014). [Guide to Fiber Optics & Premises Cabling](#). Online [Dic 2017].
- [18] IsoTools (2016) [¿En qué consiste el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo \(SG-SST\)?](#) Online [Dic 2017].
- [19] CEREM.ES (2009). [Riesgos asociados a trabajos en alturas](#). Online [Nov 2017].
- [20] arlsura (2007). [Diligenciamiento de permisos para trabajos en caliente](#). Online [Nov 2017].
- [21] Sgs Colombia (sf). [ISO 31000 - Gestión de riesgos](#). Online [Nov 2017].
- [22] Rosado, J. (2012). [Mantenimiento y reparación de instalaciones de telefonía y comunicación](#). IC Editorial.
- [23] Sendín, A. (2012) [Reglamento regulador de las infraestructuras comunes de telecomunicaciones. Disposiciones y normas comentadas](#). Ediciones Experiencia.
- [24] Bermúdez, D. & Bermúdez, J. (2013). [Caracterización de los elementos y equipos básicos de instalaciones de telecomunicación en edificios](#). IC Editorial.
- [25] Campanario, L. (2012). [Montaje de instalaciones de recepción y distribución de señales de radiodifusión](#). IC Editorial.
- [26] Avila, S. (2014). [Ejecución de proyectos de implantación de infraestructuras de redes telemáticas \(UF1878\)](#). IC Editorial.
- [27] Secretaría de Gestión de Riesgos (2012). [Referencias básicas para la gestión de riesgos 2013-2014](#). Flacso.
- [28] Fernández, D. & Munier, N. (2014). [Bases para la gestión de riesgos en proyectos](#). Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.
- [29] Vilanova, E. (2012). [Evaluación de los riesgos](#). Ediciones Díaz de Santos, Central.
- [30] Publicaciones Vértice Editorial. (2011). [Prevención de riesgos laborales](#). Editorial Publicaciones Vértice.
- [31] García, F. (2016). [Prevención de riesgos laborales y medioambientales en las operaciones de montaje de instalaciones electrotécnicas y de telecomunicaciones en edificios: UF0540](#). IC Editorial.
- [32] Pino, C. (2011). [Reglamento regulador de las infraestructuras comunes de telecomunicaciones](#). ProQuest EbookCentral.
- [33] Santacruz, J. & Jaume, B. (2004). [Guía de instalación para viviendas. REBT 2002](#). Ediciones Experiencia.
- [34] Bermúdez, D. & Luque, J. (2013). [Montaje de elementos y equipos en instalaciones de telecomunicaciones en edificios:UF0542](#). IC Editorial.
- [35] Londoño, K. (2014). [La fibra optica](#). Online [Dic 2017].
- [36] M.exam (2015). [Instalacion de fibra óptica](#). Online [Dic 2017].
- [37] Tagua, J. (2016). [Certificación, análisis y reparación de redes de datos de acuerdo a los estándares TIA/ISO en cobre y fibra óptica Disponible en internet](#). IES Gonzalo Nazareno.
- [38] [http://docshare.tips/valoracion-ambiental-proyecto-despliegue-de-infraestruc-de-telecom-en-costa-caribe-y-dpto-riacuteo-san-juan\\_59e1e20f08bbc5cf06cccf40.html](http://docshare.tips/valoracion-ambiental-proyecto-despliegue-de-infraestruc-de-telecom-en-costa-caribe-y-dpto-riacuteo-san-juan_59e1e20f08bbc5cf06cccf40.html). [Nov 2017].
- [39] [Instalación de Fibra Óptica](#). Online [Dic 2017].
- [40] Carrillo, E. (2008). [Trabajando con seguridad en electricidad](#). Online [Dic 2017].
- [41] <https://documentslide.com/documents/trabajo-de-prevencion.html> <https://documentslide.com/documents/trabajo-de-prevencion.html>. [Nov 2017].
- [42] Alberto, C., Chiesa, L. & Manterola, M. (2007). [Tendido y Verificación de Redes de Fibra Óptica](#). Online [Nov 2017].

# Análisis de un elemento estructural de concreto como losa o viga sometida a cargas dinámicas utilizando el modelo de daño plástico mediante elementos finitos

Carlos J. Slebi A.<sup>1</sup>

Tania J. Victoria R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Cantabria  
Santander – España

<sup>2</sup> Universidad Católica de Colombia  
Bogotá – Colombia

Este capítulo presenta los resultados y el análisis del modelo de daño constitutivo de plasticidad en una estructura de concreto sometida a cargas dinámicas; validado en un programa de elementos finitos. Este modelo utiliza conceptos de elasticidad isotrópica dañada en combinación con tracción isotrópica y plasticidad compresiva para representar el comportamiento inelástico del hormigón, y está diseñado para aplicaciones en las que el concreto está sujeto a cargas monótonas, cíclicas y / o dinámicas el cual está expuesto a bajas presiones de confinamiento. El modelo es un modelo de daño continuo, basado en plasticidad, para concreto, el cual asume que los dos principales mecanismos de falla son el agrietamiento por tracción y el aplastamiento por compresión del material en este caso el concreto. La evolución de la superficie de rendimiento (o falla) está controlada por dos variables de endurecimiento, y está vinculada a los mecanismos de falla bajo carga de tensión y compresión, respectivamente. Se realiza una calibración del modelo de daño CDP en el programa de elementos finitos ABAQUS, de las gráficas obtenidas se hace un análisis de la simulación de una explosión como comportamiento de una carga dinámica para diferentes resistencias de concreto.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria de la construcción el estudio y análisis del comportamiento de los materiales se hace de vital importancia para poder cuantificar y controlar la reacción de los mismos frente a diferentes fenómenos que puedan afectar de manera directa su funcionamiento y eficacia. Como bien se sabe los avances tecnológicos han mostrado un auge durante las últimas épocas. Esto significa que las soluciones tecnológicas, han simplificado en gran medida las tareas y las mediciones en muchos aspectos y ámbitos laborales.

La aparición de diverso software hace que la presión de una manera cuantitativa sea mucho más acertada que cuando se realizan mediciones de manera manual, un ejemplo de esto es el Abaqus, es un Software que utiliza el método de los elementos finitos (MEF) para la resolución de problemas. El software consta de un preprocesador (CAE) que genera unos archivos de entrada que posteriormente se tratan con el procesador. Finalmente, los resultados se pueden consultar con un post-procesador que permite ver los resultados en un entorno gráfico muy intuitivo.

Abaqus permite resolver una infinidad de problemas estructurales, tales como la evaluación de la capacidad de una placa metálica ante un sismo, el cálculo de las tensiones en distintos componentes aeronáuticos; en esta investigación se usó Abaqus para determinar y analizar el daño que sufre una estructura cuando está expuesta a cargas dinámicas.

## 2. MÉTODO

El modelo CDP es una forma modificada del criterio de falla de Drucker-Prager y tiene en cuenta la plasticidad isotrópica a compresión y tracción del concreto para representar el comportamiento inelástico del hormigón en asociación con su elasticidad isotrópica dañada. En este modelo se tienen en cuenta la compresión por tracción y el aplastamiento por compresión en concreto. [1]. El modelo constitutivo de plasticidad de daño se basa en la siguiente relación tensión-deformación (ecuación (1)):

$$\sigma = (1 - \omega_t)\bar{\sigma}_t + (1 - \omega_c)\bar{\sigma}_c \quad (1)$$

Donde  $\bar{\sigma}_t$  y  $\bar{\sigma}_c$  son las partes positivas y negativas del tensor de esfuerzo efectivo  $\bar{\sigma}$ , respectivamente, y  $\omega_t$  y  $\omega_c$  son dos variables de daño escalar, que van desde 0 (sin daños) a 1 (completamente dañado). La parte del daño del modelo se describe por las funciones de carga de daños, cargando condiciones de descarga y las leyes de evolución para variables de daño para tensión y compresión. Para el daño por tracción en la ecuación (2) y la ecuación (3).

$$f_{at} = \tilde{\varepsilon}_t(\bar{\sigma}) - k_{at} \quad (2)$$

$$f_{at} \leq 0, k_{at} \geq 0, k_{at}f_{at} = 0$$

$$\omega_t = g_{at}(k_{at}, k_{at1}, k_{at2}) \quad (3)$$

Para el daño a compresión en la ecuación (4) y la ecuación (5):

$$f_{ac} = \alpha_c \tilde{\varepsilon}_c(\bar{\sigma}) - k_{ac} \quad (4)$$

<sup>1</sup> carlos-jose.slebi@alumnos.unican.es

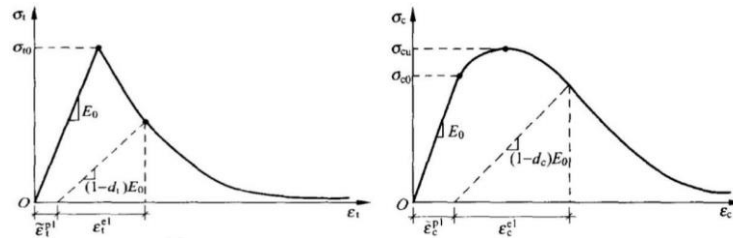
<sup>2</sup> tjvictoria42@ucatolica.edu.co



$$f_{dc} \leq 0, k_{dc} \geq 0, k_{dc} f_{dc} = 0$$

$$\omega_c = g_{dc}(k_{dc}, k_{dc1} k_{dc2}) \quad (5)$$

Aquí,  $f_{dt}$  y  $f_{dc}$  son las funciones de carga,  $\tilde{\varepsilon}_t(\bar{\sigma})$  y  $\tilde{\varepsilon}_c(\bar{\sigma})$  son las tensiones equivalentes y  $K_{dt}$ ,  $K_{dt1}$ ,  $K_{dt2}$ ,  $K_{dc}$ ,  $K_{dc1}$  y  $K_{dc2}$  SON variables del historial de daños. Además,  $\alpha_c$  es una variable que distingue entre la carga de tracción y compresión [2].



**Figura 1.** Daños uniaxiales, curva constitutiva del concreto: (A) Tensión uniaxial; (B) Compresión uniaxial

La resistencia a la tracción y compresión de concreto según el modelo CDP se puede caracterizar en la Figura 1. Como se muestra en la Figura,  $E_0$  es el elástico inicial (sin daños) en función de la rigidez del material y  $\varepsilon_c^{\sim pl}$ ,  $\varepsilon_t^{\sim pl}$ ,  $\varepsilon_c^{\sim in}$ ,  $\varepsilon_t^{\sim in}$  son, deformación plástica compresiva, tensión plástica extensible, tensión compresiva inelástica y tensión inelástica a la tracción respectivamente. Las relaciones tensión-deformación bajo esfuerzos uniaxiales de tensión y de compresión se tienen en cuenta en la ecuación (6) y la ecuación (7)

$$\sigma_t = (1 - d_t) * E_0 * (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{\sim pl}) \quad (6)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) * E_0 * (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{\sim pl}) \quad (7)$$

El CDP es actualmente uno de los modelos de concreto más populares utilizados para la simulación del comportamiento del hormigón en Abaqus. Este modelo fue descrito teóricamente en (Lubliner et al., 1989) y desarrollado en (Lee y Fenves 1998). Para una definición completa del modelo de CDP en Abaqus, se deben ingresar los siguientes parámetros obligatorios:

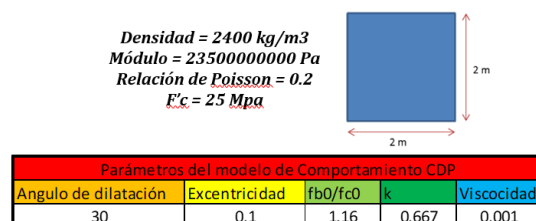
- la relación  $\sigma$ - $\varepsilon$  para la compresión del concreto como un conjunto de puntos.
- comportamiento de tensión del hormigón como un conjunto de puntos en  $\sigma$ - $\varepsilon$  que se encuentran en la curva u opcional la fractura de energía  $G$  ( $f_y$ ).
- ángulo de dilatación  $\psi$  en el plano p-q.
- excentricidad del potencial de flujo  $\varepsilon$ .
- la relación  $f_{b0} / f_{c0}$  de la tensión de fluencia biaxial a la tensión de deformación por compresión uniaxial.
- la relación  $K$  de la segunda tensión invariante en el meridiano de tracción a la del meridiano de compresión para la función de rendimiento. [3]

Principales características del modelo

- Provee la capacidad de modelar hormigón en todo tipo de estructuras como vigas, reticulados, cáscaras y sólidos.
- Utiliza conceptos de daño elástico isotrópico en combinación con comportamiento plástico isotrópico en compresión y tracción para representar el comportamiento inelástico del hormigón.
- Puede ser utilizado para modelar hormigón simple.
- Está diseñado para aplicaciones en las que el hormigón está sujeto a cargas monotónicas.
- Consiste en la combinación de una plasticidad multi-endurecimiento no asociada y un daño elástico escalar para describir el daño irreversible que ocurre durante la fractura.
- Permite al usuario controlar la recuperación de rigidez durante cargas cíclicas reversibles. [4]

## 2.1 Caso de estudio

Por medio de elementos finitos se analizaron dos estructuras, una losa de 2x2 y otra de 3x3 metros, en Abaqus se calibró de acuerdo a los parámetros establecidos para el modelo constitutivo de daño CDP. En la Figura 2 se puede apreciar la componente elástica del concreto dada por el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, por otro lado, se presenta la componente plástica dada por el Angulo de dilatación, excentricidad,  $f_{b0}/f_{c0}$ ,  $k$  y la viscosidad. La simulación en Abaqus consistió en analizar el daño que sufre la estructura de concreto cuando sucede una explosión 5 Kg de TNT que simula una carga cíclica a 2 m del centro de la losa.



**Figura 2.** Diagrama Caso de Estudio losa de concreto

### 3. RESULTADOS

De acuerdo a los parámetros del CDP, en la Figura 3 se puede observar las condiciones de borde de la losa de concreto y los empotramientos, además, también se observa el nodo crítico y el punto de explosión de 5 Kg de TNT.

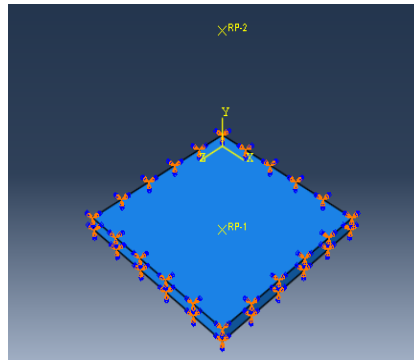


Figura 3. Condiciones de borde y empotramiento de la losa de concreto

En la Figura 4 se observa la losa de concreto al momento de simular la detonación, en este caso de la explosión se toma como una carga dinámica, el punto crítico de daño es alrededor del centro de gravedad de la losa.

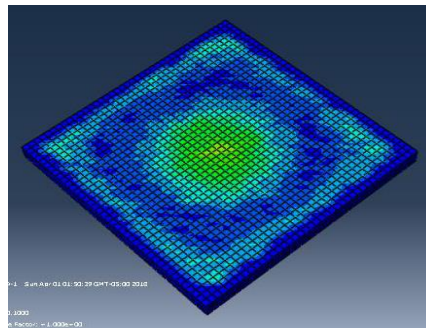


Figura 4. Daño en la estructura de concreto frente a la explosión

Al analizar la losa de concreto por elementos finitos en Abaqus, se determinó que en el momento en que ocurre la explosión, las partículas internas transitan de la zona elástica a la zona plástica; esto de acuerdo al modelo constitutivo de daño CDP. En la Figura 5 se observa las partículas de la losa en las que ocurre dicha transición.

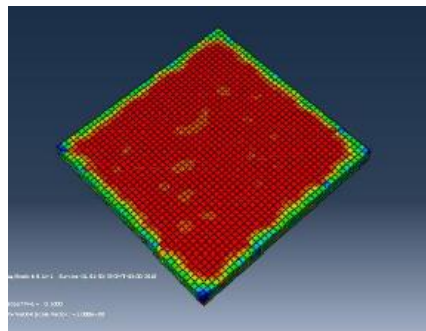


Figura 5. Transición de estado elástico a estado plástico de la losa de concreto

Para diferentes resistencias de concreto desde 20 Mpa a 35 Mpa, como se observa en la Figura 6 se validan las estructuras está sometida a esfuerzos de compresión y deformaciones teóricas y experimentales del modelo de daño plástico del concreto CDP cuando la estructura está sometida a esfuerzos de tensión. Para diferentes resistencias de concreto como se aprecia en la Figura 7 se validan las deformaciones teóricas y experimentales del modelo de daño plástico del concreto CDP cuando la estructura está sometida a esfuerzos de tensión.

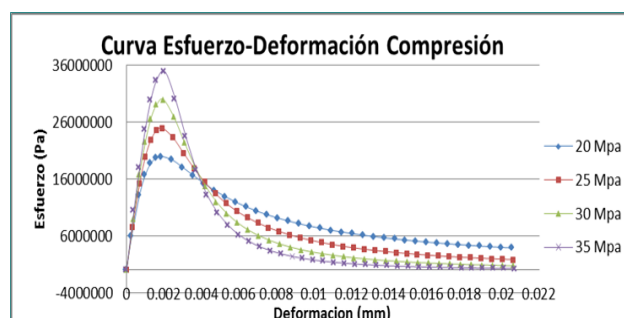
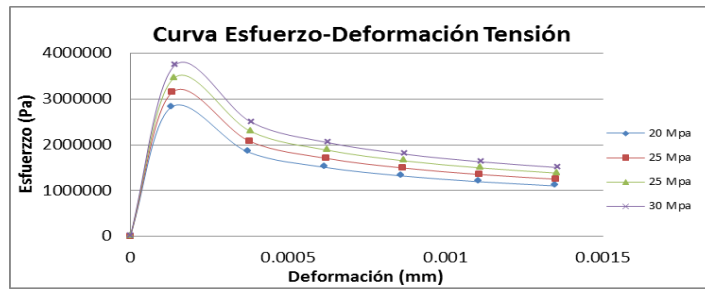
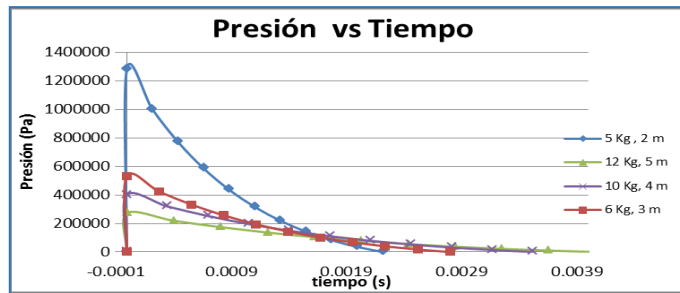


Figura 6. Curva Esfuerzo de Compresión - Deformación obtenida en ABAQUS



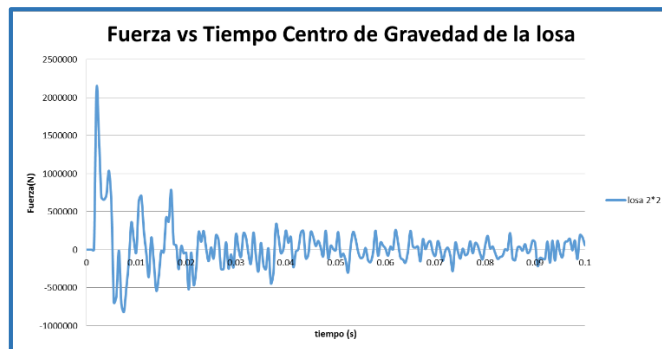
**Figura 7.** Curva Esfuerzo de Tensión - Deformación obtenida en ABAQUS

A diferentes distancias se simulan detonaciones equivalentes en TNT, en la Figura 8 se observa que la presión que genera la explosión en la losa de concreto depende de la distancia a la que esté ubicada la carga de la estructura.



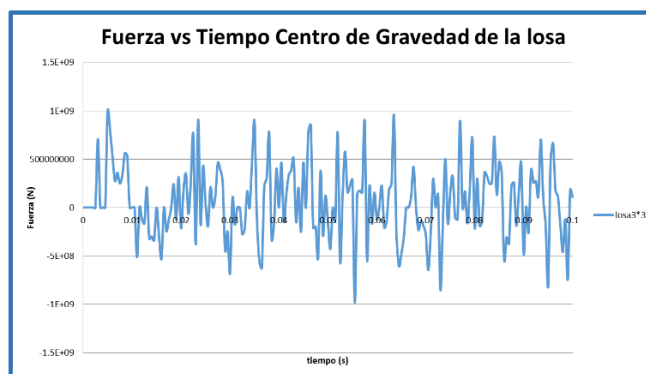
**Figura 8.** Curva Presión- Tiempo en función de la carga de TNT y distancia de la detonación

Cuando ocurren las explosiones, el centro de la losa de dimensiones de 2m x 2m recibe cerca de  $21E+05$  N en el instante en que esta ocurre, luego de 0.1 sg la onda de la explosión termina. El comportamiento de la fuerza es muy variable, a medida que el tiempo aumenta, como se aprecia en la Figura 9.



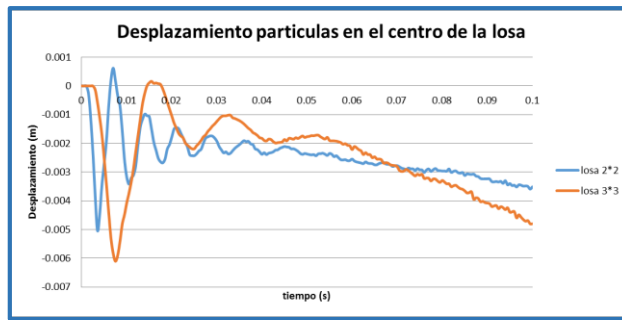
**Figura 9.** Fuerza- Tiempo en el centro de la losa de 2m x 2m de concreto

Para la losa de dimensiones de 3m x 3m se observa en la Figura 10 que la fuerza que produce la explosión es mayor que la que ocurre en la losa de 2m x 2m, el comportamiento de la fuerza es más homogéneo en relación a la otra losa estudiada; la mayor magnitud de la fuerza que recibe la losa es cerca de  $1E+09$  N al comienzo de la detonación, a medida que pasa el tiempo de la explosión la fuerza tiene cambios en su magnitud.



**Figura 10** Fuerza- Tiempo en el centro de la losa de 3m x 3m de concreto

Se analizó el desplazamiento que ocurre en el nodo ubicado en el centro de gravedad de cada losa en el tiempo que ocurre la explosión, en la Figura 11 se aprecia que en los primeros milisegundos el desplazamiento toma una forma dinámica y a medida que aumenta el tiempo el desplazamiento tiende a tener un comportamiento constante, en la losa de dimensiones de 2m x 2m la deformación alcanza 5 mm cuando comienza la explosión, mientras en la losa de dimensiones de 3m x 3m la deformación alcanzo 6 mm.



**Figura 11.** Desplazamiento de partículas en el centro de la losa de concreto

#### 4. CONCLUSIONES

Las gráficas de esfuerzo – desplazamiento del modelo CDP, se calibraron de acuerdo al modelo de daño en Abaqus y se pudo aplicar dicho modelo constitutivo en una interface de elementos finitos obteniendo buenos resultados.

Tanto las curvas fuerza – tiempo como desplazamiento – tiempo evidencian que en el instante de la explosión es donde más se presenta un desplazamiento dinámico de la losa de concreto.

Luego de realizar varias simulaciones en el software se determinó que las dimensiones de la losa tienen relación directa con la fuerza que percibe la losa al momento de la explosión; por otro lado, los daños en la estructura serán de mayor magnitud si la explosión se realiza muy cerca de ella, de esta forma la distancia de la detonación tiene una relación directamente proporcional a los daños que sufre la estructura de concreto.

Aunque el tiempo de detonación de la explosión es 0.1 segundos se evidencia que los mayores esfuerzos están presentes en milésimas de segundo.

Ya teniendo el modelo calibrado, se sugiere verificar para distintas resistencias del concreto las reacciones y desplazamientos que sufre la estructura de concreto sometida a cargas dinámicas.

La distancia a la que sucede la detonación es el factor determinante para que ocurra un daño considerable en la losa de concreto.

## REFERENCIAS

- [1] Escrig, C. (2015). Estudio del comportamiento mecánico de vigas de hormigón armado reforzadas a flexión y a cortante con materiales compuestos de matriz cementíca. Trabajo de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [2] Grassl, P. et al. (2013). CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. *International Journal of Solids and Structures* 50(24), 3805-3816.
- [3] Szczecina, Mi. & Winnicki, A. (2015). Calibration of the CDP model parameters in Abaqus. Kielce University of Technology.
- [4] Asociación Argentina de Mecánica Computacional (2017). [Cargas cíclicas y dinámicas bajo presiones de confinamiento bajas](#). Online [Dic 2017].

# Uso de cáscara de huevo como reemplazo parcial de material cementante en cubos mortero de cemento hidráulico

Francisco Gómez<sup>1</sup>  
Steven Frías<sup>2</sup>  
Viandy Bravo<sup>3</sup>  
Carlos Pacheco<sup>4</sup>  
Universidad del Norte  
Barranquilla – Colombia

La necesidad de reducir tanto los costos como la contaminación generada en obras es una de las prioridades de los ingenieros civiles, una alternativa es el aprovechamiento en los proyectos de construcción de los desechos producidos por actividades cotidianas. Países como India están a la vanguardia en investigaciones en mezclas de concreto con desechos y especialmente con cáscara de huevo, la cual se desperdicia en órdenes de toneladas anuales y todas van a parar en vertederos. Se contempló el desarrollo de diferentes mezclas de mortero de cemento hidráulico con cáscara de huevo en diferentes porcentajes de reemplazo y estados tales como natural, llevada a horno a 550°C y a horno a 800°C para evaluar las diferencias en resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días. Para el mortero con reemplazo de material en estado natural, se encontró que el porcentaje óptimo de reemplazo está entre el 3% y el 5%, obteniéndose resistencias a compresión que varían entre el 90% y más del 100% de la resistencia de la muestra control. Las otras condiciones serán evaluadas a medida que la investigación avance.

## 1. INTRODUCCIÓN

La construcción es uno de los grandes pilares para el desarrollo de una sociedad, ha sido el impulsor de grandes revoluciones y ha permitido plasmar sueños en realidad, en la actualidad el concreto de cemento Portland es uno de los materiales más usados en dicha industria, donde ofrece ventajas tales como su fácil manejabilidad, su resistencia a la compresión, y su bajo costo en comparación a otros materiales. Sin embargo, a pesar de todos los beneficios mencionados, este es a su vez responsable del 7% de toda la liberación de gases de efecto invernadero en el mundo [1], ya que para la producción del concreto se requiere la extracción de considerables volúmenes de roca y arena. Debido a esto, para la elaboración de una tonelada de dicho material es necesario 1,1 toneladas de recursos naturales [2]. De la misma forma, para la fabricación del cemento Portland se requieren procesos de incineración los cuales consumen enormes cantidades de energía, y para generar una tonelada de clinker se libera a la atmósfera la misma cantidad en dióxido de carbono.

Es por esto, que el enfoque de las investigaciones hoy en día está dirigido a reducir la cantidad de componentes que se utilizan en el concreto y encontrar nuevos materiales que puedan disminuir la cantidad de recursos necesarios para la elaboración del cemento, así como disminuir el costo requerido para la fabricación de dicho producto de construcción. Es además de especial beneficio para estas investigaciones darles uso a materiales considerados desechos, tales como cenizas volantes, fibras naturales, silicona, vidrio, caucho triturado, humo de sílice, o como el objeto de este estudio, la cáscara de huevo. Esta ha sido de gran interés para países productores de huevos tales como India y Malasia donde dicho desecho se vuelve en una problemática dado que se puede convertir en un factor alergénico para muchas personas cuando se mantiene un largo periodo de tiempo en los botaderos [3], esto sumado a los malos olores generados por este tipo de desechos, transforma a la cáscara de huevo en un material atractivo para la fabricación de materiales compuestos dado que da solución a múltiples problemas, siendo un material de fácil obtención y en muchos casos gratuito.

Esta investigación tiene como fin hacer un reemplazo de cáscara de huevo por material cementante con reemplazos en peso de 3, 5 y 8% de cáscara en cubos de morteros de cemento hidráulico de forma molida, incinerada a 550°C y 800°C. Busca comparar los resultados de la resistencia a compresión de todas las muestras con un prototipo de cubo sin reemplazo, adicionalmente se verificará las diferencias existentes debido al calor de hidratación con la ayuda de cámaras térmicas, para así determinar la efectividad de realizar concretos con este tipo de reemplazos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 El cemento Portland

El hormigón hecho con base al cemento Portland es el material constructivo más ampliamente usado en el mundo. A pesar de que existen muchos tipos de cementos, el cemento Portland es el más extendido de todos, este fue patentado por Joseph Aspdin en 1824 y debe su nombre a los acantilados de piedra caliza de la isla de Portland, en Inglaterra [4]. La producción de este cemento comienza con dos ingredientes básicos que son un material calcáreo y otro

---

<sup>1</sup> gomezjf@uninorte.edu.co

<sup>2</sup> sfrias@uninorte.edu.co

<sup>3</sup> vbravo@uninorte.edu.co

<sup>4</sup> cbustosa@uninorte.edu.co

arcilloso. El material calcáreo es un óxido de calcio como la piedra caliza, el yeso o las conchas de ostras, mientras que el material arcilloso es una combinación de silicio y aluminio que pueden extraerse a partir de arcillas, esquistos o escorias de alto horno. Estos materiales deben ser molidos y almacenados para luego enviarse a un horno principal en el que se funden a temperaturas de 1400°C y 1650°C lo que transforma estos materiales en Clinker de cemento. Posteriormente este Clinker, debe ser molido para obtener un polvo fino al cual se le añadirá una pequeña cantidad de yeso que regula el tiempo de fraguado del cemento en el hormigón. [4][5]. El cemento Portland está compuesto químicamente principalmente por cal, sílice, óxido de aluminio y óxido de hierro, estos materiales en el horno formando compuesto químicos complejos, ya que la calcinación reestructura la composición molecular, produciendo cuatro compuestos principales que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Composición química del cemento Portland [4]

Compuesto	Fórmula química	Fórmula común	Rango usual en peso (%)
Silicato tetracálcico	$3CaO - SiO_2$	$C_3S$	45-60
Silicato dicálcico	$2CaO - SiO_2$	$C_2S$	15-30
Aluminato tricálcico	$3CaO - Al_2O_3$	$C_3A$	6-12
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO - Al_2O_3 - Fe_2O_3$	$C_4AF$	6-8

La industria de la construcción se ha desarrollado de forma que cada vez más se enfrenta a nuevos retos de ingeniería que demandan materiales con características diferentes, por lo cual las cementeras han desarrollado varios tipos de cementos para generar concretos con diferentes especificaciones. La Tabla 2 resume los principales tipos de cementos y sus aplicaciones.

**Tabla 2.** Tipos de cemento utilizados actualmente [4]

Tipo	Nombre	Aplicación
I	Normal	Trabajo general con hormigón cuando no sean necesarios las propiedades de los otros tipos; es el más utilizado.
II	Resistencia moderada a sulfatos	Protección moderada a sulfatos, entre 0.1-0.2% de peso de sulfatos solubles en agua en suelos o 1500-10800ppm de sulfatos en agua; es utilizado para la construcción de muelles y muros de contención.
III	Alta resistencia inicial	Utilizado en la construcción rápida cuando es necesario eliminar los encofrados rápidamente o se requiere poner en funcionamiento la estructura lo antes posible
IV	Bajo calor de hidratación	Utilizado en construcciones masivas, donde el calor de hidratación que se genera es de gran relevancia para el fraguado y curado del concreto
V	Alta resistencia a sulfatos	Protección frente a exposición severa a sulfatos, entre 0.1-2% de peso de sulfatos solubles en agua en suelos o 1500-10800ppm de sulfatos en agua

## 2.2 La hidratación del cemento

La hidratación es la reacción química que ocurre entre las partículas de cemento y el agua, estas reacciones son el cambio en la naturaleza molecular de los materiales y se pueden caracterizar a partir del nivel de energía y la velocidad de la reacción. La hidratación se lleva a cabo a través de dos mecanismos, el mecanismo de solución y el químico, que ocurre cuando el elemento es sólido. El mecanismo de solución tiene como primera etapa la disolución de los compuestos anhidros, la segunda etapa es la formación de hidratos en la solución y la tercera etapa es la decantación de los hidratos a partir de la solución sobresaturada. Este mecanismo domina las etapas iniciales de la hidratación, donde la relación entre aluminatos y sulfatos es la que determina la velocidad del fraguado. A partir de la reacción, la pasta de cemento puede ser trabajable durante unos 45 minutos, después de los cuales la pasta empieza a adquirir una determinada rigidez, lo que se conoce como fraguado [6].

**Tabla 3.** Reacciones químicas en el proceso de fraguado del concreto [4]

Reactivos	Productos		
$2(3CaO \cdot SiO_2)$ Silicato tetracálcico	$+ 6H_2O$ Agua	$= 3CaO \cdot SiO_2 \cdot 3H_2O$ Silicato tetracálcico hidratado	$+ 3Ca(OH)_2$ hidróxido de calcio
$2(2CaO \cdot SiO_2)$ Silicato dicálcico	$+ 4H_2O$ Agua	$= 3CaO \cdot SiO_2 \cdot 3H_2O$ Silicato tetracálcico hidratado	$+ Ca(OH)_2$ hidróxido de calcio
$3CaO \cdot Al_2O_3$ Aluminato tricálcico	$+ 12H_2O + Ca(OH)_2$ Agua Hidróxido de calcio	$= 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(OH)_2 \cdot 12H_2O$ Aluminato de calcio hidratado	
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ Ferroaluminato tetracálcico	$+ 10H_2O + 2Ca(OH)_2$ Agua Hidróxido de calcio	$= 6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot 12H_2O$ Ferroaluminato cálcico hidratado	
$3CaO \cdot Al_2O_3$ Aluminato tricálcico	$+ 10H_2O + 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Agua Yeso	$= 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ Monosulfoaluminato cálcico hidratado	

Como se muestra en la Tabla 3, el proceso de hidratación química de los silicatos produce tanto hidróxido de calcio como C-S-H. La hidratación completa del  $C_3S$  produce un 61% de C-S-H y un 39% de hidróxido de calcio, mientras que la hidratación del  $C_2S$  genera un 82% de C-S-H y un 18% de hidróxido de calcio. Dado que el C-S-H es el que aporta la resistencia a la pasta de cemento hidratada, la resistencia máxima aumenta incrementa el contenido de  $C_2S$  en

relación con la cantidad de  $C_3S$ , además, el hidróxido de calcio puede ser atacado por los sulfatos y aguas ácidas, por lo que al incrementar el contenido de  $C_2S$  aumenta la durabilidad del hormigón. [6] En contraposición, el  $C_3S$  se hidrata más rápidamente, por lo que contribuye a un menor tiempo de fraguado y a generar resistencia inicial mayor.

### 2.3 Calor de hidratación

Cada uno de los constituyentes de los concretos presentados anteriormente generan diferentes comportamientos en relación con la generación de calor de hidratación, fraguado y su reacción ante la presencia de agua. Las reacciones químicas, aunque son muy complejas se pueden describir de una manera relativamente sencilla observando la Figura 1, la cual muestra el calor de hidratación por etapas que van desde los minutos iniciales de la reacción química hasta los días posteriores.

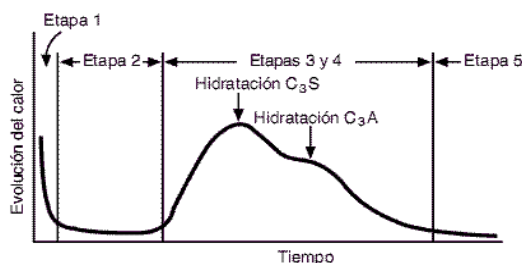


Figura 1. Calor de hidratación del concreto [7]

La primera reacción la efectúa el  $C_3S$ , como se mencionó anteriormente aporta la mayor resistencia mecánica y desarrolla un mayor calor de hidratación, fraguado rápido y afecta la resistencia inicial. El  $C_2S$ , desarrolla su resistencia lentamente con la acción del agua, por lo cual su calor de hidratación es más bajo y su resistencia a compresión se empieza a desarrollar a los 7 días. El aporte en cuanto a resistencia mecánica de los otros componentes del clinker, como el aluminato tricálcico y el ferro aluminato tetracálcico es relativamente poco significativo, por ende, su efecto en el calor de hidratación es mínimo. [7]. Como dice Sánchez de Rojas y Frías [8] "El desarrollo de calor es rápido durante el fraguado y parte del endurecimiento, disminuyendo progresivamente al hacerse la hidratación más lenta, hasta llegar a estabilizarse. Así, en los primeros 3 días se genera el 50% del calor y el 80% hasta los 7 días", el calor de hidratación de la mezcla se ve reflejado en el aumento de temperatura, y en la exudación de la mezcla, por lo cual en concretos masivos se busca una disminución de exudación para evitar la pérdida de agua y de resistencia por falta de hidratación.

### 2.4 Impacto ambiental

La Revolución industrial fue la causante del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero como el  $CO_2$ . Antes de esta, la concentración de dicho gas rondaba de 200 a 280 ppm, mientras en noviembre de 2014 dicha concentración alcanzó las 398 ppm, y está proyectada a crecer cerca de 800 ppm al final del siglo [9]. Una de las razones del aumento de esta concentración es el incremento de las construcciones elaboradas en concreto, la industria cementera es la culpable de cerca del 7% de las emisiones de todos los gases de efecto invernadero que se arrojan a la atmósfera anualmente [1]. En promedio se produce una tonelada de concreto por cada habitante del planeta tierra [9], y de la misma forma se requiere la extracción 1,1 toneladas de recursos naturales (como agua, grava, arena, etc) para que esa tonelada sea producida [2], es decir anualmente se están explotando cerca de 8.030 millones de toneladas de recursos naturales para la producción de concreto.

En el 2013 se generó una producción mundial de 36 Gt de  $CO_2$ , debido al uso del cemento Portland, esto fue un incremento de cerca del 2,3% con respecto al año 2012, y un incremento del 61% con respecto al año de 1990 [9]. Aun así, el  $CO_2$  no es la única problemática generada por la industria cementera, las actividades como el procesamiento industrial y la minería son las principales fuentes generadoras de contaminación por metales pesados en el ambiente. Esta industria también es culpable del aumento de factores cancerígenos, los cuales vienen principalmente de los procesos de producción de energía y el uso de combustibles fósiles. Así mismo el mal manejo que se da a los residuos generados en esta industria, y la sobre explotación de las canteras, genera un daño sobre la calidad de la tierra que imposibilita sus usos durante muchos años [9].

### 2.5 Reemplazo por cementante

Desde la década de 1970 la industria constructiva ha usado diversos subproductos de otras industrias como aditivos cementosos, estos materiales se han usado para mejorar alguna de las propiedades del concreto. Estos materiales incluyen el polvo de ceniza, las escorias de horno alto molidas, el humo de sílice y las puzolanas naturales; son principalmente un cemento hidráulico no metálico compuesto básicamente de silicatos y aluminosilicatos de calcio, y reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas normales para formar compuesto que presentan propiedades cementosas [5]. Nuevas investigaciones apuntan a la utilización de residuos sólidos urbanos, industriales y agroindustriales, de esta manera nace la idea de recopilar información sobre la utilización de la cáscara de huevo como material cementante suplementario y realizar una investigación sobre el comportamiento de mezclas de mortero con este reemplazo en ensayos a compresión y compararlas con una mezcla control, verificando la viabilidad del reemplazo.



## 2.6 La cáscara de huevo

En Colombia y el mundo, el huevo representa un alimento básico para la canasta familiar, es un producto rico en proteínas y minerales, que también es usado ampliamente en la industria alimentaria tal como en restaurantes, pastelerías, panaderías, etc. Un colombiano promedio consume aproximadamente 252 huevos por año según Fenavi lo cual genera un residuo de aproximadamente 13 mil millones de cáscaras de huevos en Colombia [10] desperdiciadas sin darle un uso adecuado y depositándolos en botaderos que generan malos olores y lixiviados difíciles de tratar.

La cáscara de huevo está constituida aproximadamente entre 94% y 97% por carbonato de calcio, mientras que el 3% es materia orgánica y pigmento de cáscara de huevo, generalmente fósforo, magnesio, potasio, zinc, manganeso, hierro y cobre (Tabla 4); una cáscara de huevo de buena calidad contiene aproximadamente 2,2 gramos de calcio en la forma de carbonato de calcio  $CaCO_3$ . La calidad de la cáscara del huevo se determina por el color, la forma, y la estructura de la cáscara. Los colores pueden variar de blanco a tonos a marrón y la forma del huevo puede también variar [11].

**Tabla 4.** Composición química de la cáscara de huevo [11]

Composición química	Contenido (%)
Carbonato de calcio ( $CaCO_3$ )	94
Carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ )	1
Fosfato de calcio	1
Materia Orgánica	4

Investigadores como Freeda [12] y Cree [13] se han centrado en la utilización de cáscara de huevo incinerada a altas temperaturas, debido que se obtiene un compuesto químico bastante utilizado en la antigüedad como lo es el óxido de calcio o conocido más comúnmente como cal viva [13]; este elemento actúa como un aglutinante al momento de hidratarse, convirtiéndose en una pasta de hidróxido de calcio, ligando los elementos que le rodean. Se muestra a continuación, en la Tabla 5, la composición química de la cáscara de huevo luego de incineración a 500°C.

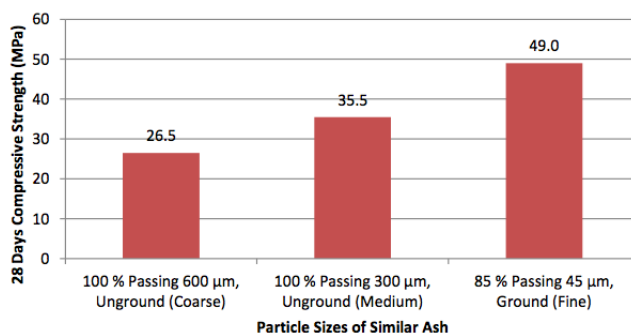
**Tabla 5.** Composición química de la cáscara de huevo incinerada a 500° [11]

Composición Química	Contenido (%)
Oxido de calcio ( $CaO$ )	50,7
Dióxido de silicio ( $SiO_2$ )	0,09
Oxido de aluminio ( $Al_2O_3$ )	0,03
Óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ )	0,02
Oxido de magnesio ( $MgO$ )	0,01
Oxido de sodio ( $Na_2O$ )	0,19
Oxido de estroncio ( $SrO$ )	0,13
Oxido de níquel ( $NiO$ )	0,001
Oxido de fosforo ( $P_2O_5$ )	0,24
Óxido de azufre ( $SO_3$ )	0,57
Cloro ( $Cl$ )	0,08
Perdidas por ignición	47,8

Estudios realizados en India y Malasia sobre la cáscara de huevo como material de reemplazo del cemento portland, muestran que los morteros de concreto con bajos porcentajes de reemplazo (inferiores al 5%) en ensayos de compresión y flexión, presentan un comportamiento similar al de los morteros de concreto sin reemplazo [14-16].

## 2.7 Efecto de la finura de las partículas en la resistencia a compresión del concreto

La teoría menciona que entre más pequeño sea el tamaño de un material cementante, ayudará más a incrementar la resistencia a compresión del concreto y a su vez aumentará el área de cobertura del material, lo que garantiza la completa adherencia de las partículas [17]. Además, el tamaño de las partículas también determina el tiempo de fraguado dado que entre más pequeñas sean las partículas más rápido podrán reaccionar con el agua a su alrededor, por tanto, el módulo de finura del reemplazo afecta directamente la relación agua cemento de las mezclas [12], y la resistencia a compresión a 28 días, tal como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Comparación de la resistencia a compresión última en muestras de concreto variando el tamaño de las partículas de reemplazo [17]

### 3. MÉTODO

La metodología usada para la elaboración de los cubos de mortero está basada en la Norma Colombiana NTC 220 [18] (traducción de la norma norteamericana ASTM C109) denominada: Determinación De La Resistencia De Morteros De Cemento Hidráulico Usando Cubos De 50 mm o 50,8 mm De Lado, la cual describe con detalle los procedimientos a seguir para la creación de cubos de mortero de 50 mm de arista.

Para la realización de esta investigación se tomó como patrón de comparación una mezcla control y tres tipos de reemplazos de cáscara de huevo por cemento Portland tipo I: natural (CHn), (se tiene prevista la realización de mezclas con cáscara de huevo incinerada a 550°C (CH550) e incinerada en horno a alta temperatura a 800°C (CH800)); para su uso, las cáscaras fueron lavadas en un tanque durante 5 horas después de ser recolectadas, y el proceso de secado se realizó dejando las cascaras extendidas sobre un plástico al aire libre durante 5 horas en el día.

Posteriormente se realizó un proceso de trituración manual con mortero y crisol de las cáscaras de huevo, se seleccionó todo el material con tamaño inferior a 0,180 milímetros (tamiz #80 norma ASTM E11-95) [19]. Se definió realizar mezclas con porcentajes de reemplazo del 3%, 5% y 8% por cemento Portland, se fundieron 9 cubos de cada mezcla según las especificaciones utilizando las cantidades de material de la norma (Tabla 6), y se dejaron 24 horas en sus respectivos moldes, para luego ser desmoldados y ser llevados a un tanque con agua para asegurar un proceso óptimo de curado. Se comprobó la resistencia temprana a compresión de los cubos a 7 días, en el cual ya se ha desarrollado más de un 50% de la resistencia total, así como a los 14 y 28 días de curado, para evaluar su resistencia intermedia y final a través una máquina de compresión axial registrando la resistencia última en mega pascales.

**Tabla 6.** Cantidades de material para fabricación de la mezcla control [18]

Material	6 cubos
Cemento	500 g
Arena	1375 g
Agua	242 g

### 4. RESULTADOS

En las siguientes Figuras (3 y 4) se presentan algunos apartes de la realización de los ensayos de los cubos de mortero. En la Figura 3 se muestra la cáscara de huevo después del proceso de triturado que se utilizó para elaborar la mezcla CHn, y la Figura 4 muestra los cubos de mezcla CHn después de ser desencofrados y listos para ser dejados en el tanque de inmersión y asegurar el proceso de curado.

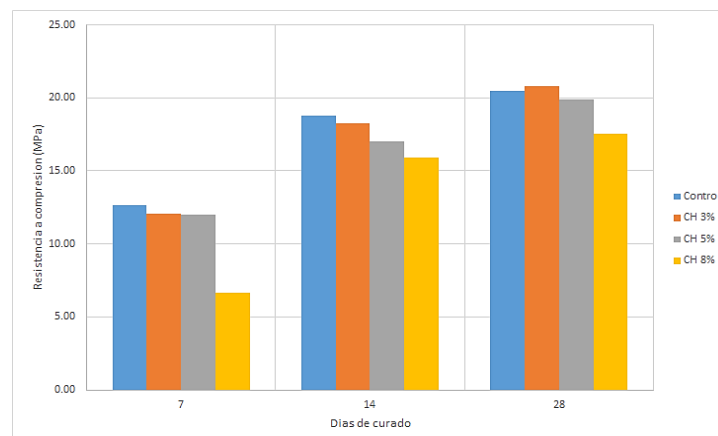


**Figura 3.** Cáscara de huevo triturada



**Figura 4.** Cubos de mortero mezcla CHn

La Figura 5 resume los resultados a compresión de los diferentes cubos para las mezclas control y CHn con sus respectivos porcentajes de reemplazo en los días curado.



**Figura 5.** Resultados resistencia a la compresión para diferentes días de fraguado

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se evidencia hasta el momento, que las mezcla con CHn tienen muy buen comportamiento con respecto a la mezcla control en porcentajes de 3% y 5% tal como se observa en la Figura 6, se alcanzó más del 100% de la resistencia a

compresión de la mezcla control para cuando se realizó el ensayo a la mezcla con 3% de reemplazo (CHn 3%), 96% para la mezcla con 5% de reemplazo (CHn 5%) y más del 80% para la mezcla con 8% de reemplazo (CHn 8%). Teniéndose entonces, que el reemplazo óptimo se encontraría entre el 3 y el 8% de la cantidad total de cemento. Así, desde el punto de vista económico, se tiene que al utilizar diferentes reemplazos se puede reducir considerablemente los costos de construcción en obra, para un metro cúbico de mortero de pega 1:2.75 se tiene el análisis mostrado en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Comparativa económica de costos de metro cúbico de mortero

MEZCLA	Cemento (Kg)	Arena (m3)	Agua (L)	Precio	Ahorro (%)
Mortero 1:2.75	493	1.067	236.6	\$239,848	--
Reemplazo 3%	478.21	1.067	236.6	\$233,488	2.65
Reemplazo 5%	454.2995	1.067	236.6	\$223,207	6.94
Reemplazo 8%	417.95554	1.067	236.6	\$207,579	13.45

Pese a que parece ser un porcentaje pequeño, de cualquier forma, resulta provechoso, pues en una obra de construcción, dependiendo de en qué consista, la cantidad de mortero hidráulico utilizada es mucho mayor. Y eso, sin mencionar las repercusiones que dentro del medio ambiente tendría la disminución de la demanda de cemento para mortero hidráulico. Producir un 3% o un 5% menos de cemento se vería reflejado a la larga en las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera por la incineración de los componentes del producto en cuestión y en la disminución de material particulado en la atmósfera a partir de la extracción, el transporte y la molienda de la caliza.

Investigaciones sugieren que el comportamiento de la cáscara de huevo en mezclas de mortero se puede mejorar reduciendo el tamaño de la partícula [12], pero se requiere de un estudio más detallado para determinar cómo afecta el módulo de finura en el proceso de fraguado y en la relación agua cemento, además de cómo se vería afectada la mezcla sustituyendo cemento por otras mezclas de cáscara de huevo a diferentes temperaturas de incineración.

Se deja para futuras investigaciones la formulación de una dosificación optimizada para las mezclas teniendo en cuenta las propiedades fisicoquímicas de los materiales; además es necesario realizar análisis de granulometría láser para identificar un módulo de finura aproximado de la cáscara de huevo.

## 6. CONCLUSIONES

Actualmente nos encontramos en una época en la que se quiere preservar el ambiente, y grandes empresas están invirtiendo recursos en el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías que lleven al cumplimiento de ese objetivo. Ideas como estas podrían ser utilizadas en la industria de la construcción, no solo a nivel regional si no también nacional o incluso internacional; ya muchas organizaciones se han unido a la causa ofreciendo productos en el mercado que contienen materiales alternativos como concreto reciclado, escorias, vidrio, etc.

Utilizar mortero con cáscara de huevo puede ser otra manera de reducir los impactos negativos por la producción del cemento Portland y colaborar con la preservación del medio ambiente; se evidenció con esta investigación que la cáscara de huevo es un material potencial en la construcción al ser utilizado como material cementante suplementario en morteros, las resistencias finales obtenidas no varían en gran porcentaje con las obtenidas en los ensayos control por lo cual se puede aceptar como un buen reemplazo, de acuerdo a lo establecido en normas técnicas como la canadiense o la americana las cuales aceptan porcentajes de reemplazo de calcita en concreto de hasta el 5% (carbonato de calcio), que es el componente esencial de la cáscara de huevo. Es necesario así, una mayor cantidad de ensayos y análisis de laboratorio que demuestren las propiedades del reemplazo óptimo en un material aceptable para la construcción de edificaciones o pavimentos tales como ensayos de fluidez, desgaste, abrasión, pérdida de material, porosidad, ensayos a flexión, calorimetría, etc.

## REFERENCIAS

- [1] Eldhose, N. & Sasy, D. (2015). An Experimental Study on Strength of Concrete by Partial Replacement of Cement by Egg Shell Powder and Aggregates by Crumb Rubber. *IJEDR* 3(4), 321-326.
- [2] Eldhose, N. & Sasy, D. (2015). Experimental investigation on properties of cement mortar incorporating eggshell powder. *JEAD* 19(6), 198-209.
- [3] Akhil, S. & Kumar, P. (2016). Experimental Study on Concrete by Partial Replacement of Fine Ag- gregate with Fly Ash and Egg Shell Powder. *IJAETMR* 1(1), 15-21.
- [4] Mamlouk, M. & Zaniewski, J. (2004). *Cemento Portland en Materiales para ingeniería civil*. Pearson.
- [5] Hewlett, P. (1998). *Portland Cement: Classification and manufacture en Lea's Chemistry of cement and concrete*. Elsevier.
- [6] Ochoa, L. & Flores, E. (1995). Química del cemento. *Revista de Química* 9(1), 29-38.
- [7] Silva, O. (2018). [¿Cómo se produce el proceso de hidratación del cemento?](#) Online [Mar 2018].
- [8] Sánchez, M., Frías, M. & Rivera, J. (2000). Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros con materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales. *Materiales de construcción* 50(260), 39-48.
- [9] Salas, D. et al. (2015). Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review. *Journal of Cleaner Production* 113, 114-122.
- [10] Fenavi (2016). [Colombianos consumen en promedio 252 huevos y 30 kilos de pollo al año](#). Online [Dic 2017].
- [11] Bin, H. (2014). Eggshell as an additive in concrete mix. Resources, University Malaysia Pahang.
- [12] Freeda, C., Aleena, P. & Karthiga, M. (2014). Micro-elemental study on egg Shell ash in cement. Karunya University.
- [13] Cree, D. & Rutter, A. (2015). Sustainable Bio-inspired limestone eggshell powder for potential industrialized applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 3(5), 941-949.
- [14] Yerramala, A. (2014). Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement. *The Indian Concrete Journal* 88(10), 94-102.
- [15] Al-Safy, R. (2015). Experimental investigation on properties of cement mortar incorporating eggshell powder. *Journal of Engineering and Development* 19(6), 198-206.
- [16] Karthick, J., Jeyanthi, R. & Petchiyammal, M. (2014). Experimental Study on Usage of Egg Shell as Partial Replacement for Sand in Concrete. *IJARET* 1(1), 7-10.
- [17] Shan, E. (2015). Engineering properties of lightweight foamed concrete with 7.5 % eggshell as partial cement replacement material. Lee Kong Chian Faculty of Engineering and Science.
- [18] Icontec (2004). Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado. Norma Técnica Colombiana NTC 220.
- [19] ASTM (1995). Specification for wire cloth and sieves for testing purposes. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. ASTM E11-95.

El secado es una de las operaciones del proceso de beneficio del café, consiste en extraer la humedad del grano hasta un nivel que permita el almacenamiento conservando sus propiedades organolépticas. El uso de invernaderos solares para realizar esta operación es muy frecuente entre los caficultores, permite el control de algunos factores que de otra manera afectan la calidad del producto, sin embargo, cuando la temperatura interna del invernadero es superior a los 35 °C, se producen efectos negativos que posteriormente se reflejan en la calidad de taza afectando los ingresos del caficultor. Para resolver esta situación se instalaron cuatro ventiladores en los extremos del invernadero, para forzar una corriente de aire fresco y evitar que la temperatura interna sea mayor a la mencionada. La velocidad de giro de los ventiladores es regulada por un control difuso, el cual ajusta dicha velocidad en función del comportamiento de la temperatura interna del invernadero. El sistema instalado resuelve el problema, en las pruebas que se hicieron en campo la temperatura siempre estuvo por debajo de los 35 °C, se evitó perjuicios en la calidad del producto y se asegura por parte de los caficultores que la corriente de aire de los ventiladores contribuye a mejorar esta operación.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las formas de comercializar el café en Colombia es el café pergamino, el cual se obtiene como resultado del proceso de beneficio, que consiste en un conjunto de operaciones posteriores a la cosecha que los caficultores realizan en unas instalaciones que tienen en sus fincas llamadas beneficiaderos. El proceso de beneficio transforma el fruto en café pergamino el cual por su estabilidad en un amplio rango de condiciones ambientales se puede almacenar para posteriormente comercializar, implica las operaciones de recibo, despulpado, fermentado, lavado y secado [1].

El secado es una de las operaciones más importantes del proceso de beneficio, consiste en eliminar parte del agua del grano, desde 55% b.h. de contenido de humedad inicial, hasta un 10 a 12% b.h. de contenido de humedad final [2], con el interés de almacenarlo durante periodos prolongados para después comercializarlo. Si se almacena con contenidos de humedad superiores a los establecidos existe un alto riesgo de ser atacado por hongos y de ser contaminado con mico toxinas, en tal caso el grano pierde su calidad, ocasionando su rechazo en los mercados nacionales e internacionales afectando drásticamente los ingresos de los caficultores [3].

En el Departamento de Nariño se produce un café considerado de alta calidad por sus características de sabor, aroma, suavidad, etc. Diversos factores como el origen volcánico de los suelos nariñenses, las condiciones geográficas (latitud y clima), condiciones de siembra [4], han permitido alcanzar grandes reconocimientos como el puntaje que se logró (94.92) en el año 2010 en el Concurso Internacional de la Taza de la Excelencia, considerado uno de los más altos a nivel mundial [5].

En las visitas de campo que se realizó para adelantar esta investigación se encontró que los caficultores realizan el secado de diferentes maneras. El secado artesanal que consiste en secar el café en patios o tendidos de costal, el café se seca debido al calor suministrado por el sol, se corre el riesgo de contaminación por factores externos como polvo, malos olores, animales que puedan pisotear el grano, etc. Otros utilizan máquinas secadoras las cuales han sido descartadas en muchos de los casos porque se sacrifica la calidad de taza probablemente como consecuencia de acelerar del proceso y por la contaminación que genera el uso de combustibles. Una opción que ha logrado resolver algunos de los problemas anteriores es el uso de invernaderos solares en los cuales también se hace uso de la energía solar, se tiene control sobre los agentes de contaminación externos y en general el proceso de secado ha dado buenos resultados en cuanto a calidad de taza.

Un aspecto que plantean los caficultores que utilizan el invernadero solar para el secado, es que cuando el día es muy soleado la temperatura al interior del invernadero sube bastante incluso hasta los 70 °C, lo cual afecta al grano, se ha observado que, si la temperatura del grano es mayor a 45 °C, se deteriora la calidad del café [6]. El caficultor tiene que estar pendiente de manera permanente para evitar esta situación, en caso tal tiene que abrir las cortinas del invernadero y permitir que el aire fresco fluya y disminuya la temperatura interna.

Se hizo el intento de resolver esta problemática instalando unos ventiladores los cuales se accionaban automáticamente, mediante un control ON-OFF, cuando la temperatura interna alcanza los 35 °C, de acuerdo a sugerencias de los caficultores, esto resolvió en parte el problema, sin embargo, cuando se presentaron días soleados los ventiladores no fueron capaces de evacuar la cantidad de aire caliente que se acumuló. Por lo anterior se planteó el desarrollo de un sistema que tenga en cuenta el comportamiento de la temperatura interna del invernadero, de acuerdo a ello ir evacuando paulatinamente el aire seco e ir incorporando aire fresco con el fin de evitar que sobrepase los 35 °C.

---

<sup>1</sup> [jaimeruiz@udenar.edu.co](mailto:jaimeruiz@udenar.edu.co)

<sup>2</sup> [hugo\\_ruizp@hotmail.com](mailto:hugo_ruizp@hotmail.com)

## 2. MÉTODO

Para abordar este trabajo de investigación y desarrollo tecnológico se hicieron visitas de campo, a algunas de las fincas cafeteras del municipio de Buesaco en el Departamento de Nariño. En estas visitas además de conocer como los caficultores realizan la operación de secado del café se logra identificar la problemática relacionada con el efecto negativo que se produce sobre el grano del café cuando el secado se hace en un invernadero solar y su temperatura interna aumenta por encima de los 35 °C. Esta información se complementa realizando una revisión literaria relacionada con el proceso de secado del café y el comportamiento climatológico en el municipio de Buesaco. Con la información anterior se hizo el Diseño Conceptual del sistema de control, se seleccionó la estrategia de control más adecuada y se definieron las especificaciones técnicas del sistema de control.

Luego se determinó el mecanismo de control que se implementará para evitar que la temperatura interna del invernadero supere los 35 °C. Este ejercicio conduce a la elaboración de un diagrama en bloques que representa la funcionalidad del mecanismo, donde se puede identificar las variables de entrada y salida. Después se realizó el diseño detallado del sistema de control que incluye la descripción de las variables de entrada y salida, definición de las variables lingüísticas, establecimiento de las reglas de control, selección del método de inferencia y la defusificación. Se hace la implementación del sistema de control, paralelamente a la implementación se realizan pruebas preliminares en laboratorio y finalmente se hacen pruebas de validación del sistema en laboratorio y en campo.

## 3. RESULTADOS

En cada una de las actividades planteadas en la metodología se obtuvieron resultados, en consecuencia, la descripción de estos se realiza en concordancia con la metodología planteada.

### 3.1 Diseño conceptual y especificaciones técnicas

Para el Diseño Conceptual del sistema de control se tuvieron en cuenta varios aspectos que se mencionan a continuación:

1. La temperatura al interior del invernadero solar para secar café, no debe sobrepasar los 35 °C, para ello se instalarán dos ventiladores y dos extractores en los costados del invernadero como lo muestra la Figura 1, con el fin de evacuar el aire caliente y forzar el ingreso de aire fresco para disminuir la temperatura interna.

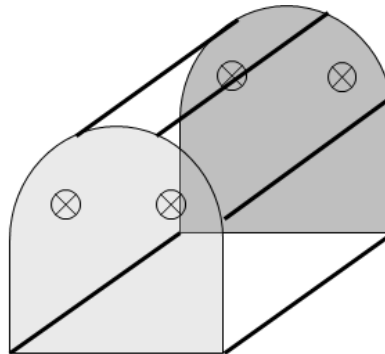


Figura 1. Invernadero solar

2. Inicialmente se implementó un control ON-OFF el cual encendía los ventiladores y extractores cuando se llega a la temperatura límite, el sistema no funcionó cuando los días son muy soleados probablemente porque no eran capaces de evacuar la cantidad de aire caliente acumulado en el invernadero.
3. Por lo anterior se decide implementar una estrategia de control más compleja que tenga en cuenta diferentes aspectos: los ventiladores y extractores deben comenzar a evacuar el aire caliente antes de alcanzar la máxima temperatura, es decir se debe establecer una temperatura de inicio a partir de la cual, los actuadores iniciaran la evacuación de aire caliente a una baja velocidad que irá aumentando en la medida en que aumente la temperatura interna del invernadero. De esta manera el aire caliente no se acumula y los ventiladores tendrán la capacidad de evacuar menores cantidades de aire caliente.
4. El sistema de control después de que la temperatura interna sea la mínima establecida, debe examinar de manera permanente la temperatura y de acuerdo a ello ajustar la velocidad de los ventiladores.
5. Teniendo en cuenta lo anterior se decidió que la estrategia de control más adecuada que se acomoda a las condiciones y necesidades del control es el Control Difuso, el cual no requiere un modelo matemático para ser implementado, pero si es necesario conocer el proceso [7], como en este caso.

Para el diseño del prototipo del sistema de control se establecen las siguientes especificaciones técnicas:

1. La temperatura mínima para que el Sistema de Control inicie su operación es de 20 °C, este límite se determinó teniendo en cuenta el estudio realizado por Pérez et al., [8] en el cual se establece que las temperaturas mínimas en la zona cafetera colombiana están por debajo de los 20 °C.

2. La máxima temperatura es de 35 °C, el sistema debe garantizar que no aumente más la temperatura interna del invernadero para evitar deterioros en el grano del café. Se estableció este límite de temperatura a partir de la experiencia de los caficultores y los reportes presentados por [6].
3. Se utilizarán dos ventiladores y dos extractores para disminuir la temperatura interna del invernadero, los cuales variarán su velocidad de acuerdo a las decisiones del Sistema de Control.

### 3.2 Mecanismo de control

La Figura 2 muestra el mecanismo de control donde se establece la relación entre la temperatura interna del invernadero y el control difuso. La salida del control difuso corresponde a la velocidad de los ventiladores, los cuales generan una corriente de aire fresco para disminuir la temperatura interna.

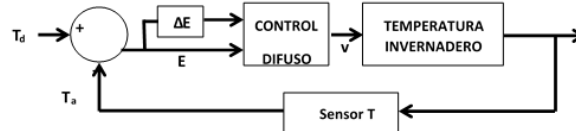


Figura 2. Mecanismo de control

### 3.3 Diseño detallado del control difuso

- *Identificación de las variables de entrada.* Para establecer y caracterizar las variables de entrada se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:
  - El sistema de control realiza su operación en el rango de temperaturas comprendido entre 20 y 35 °C.
  - Se establece que la temperatura deseada o de referencia es de 25 °C, este parámetro que es muy importante para el diseño del sistema de control, es sugerido por los caficultores quienes afirman que esa es una buena temperatura para realizar el secado del café. El sistema de control tiene dos variables de entrada:
    - *Error de Temperatura (ET):* definida como Temperatura de referencia (Tr), menos la Temperatura actual medida en el invernadero (Ta), como se establece en la ecuación (1).

$$ET = Tr - Ta$$

$$ET = 25 \text{ °C} - Ta \quad (1)$$

El Universo de Discurso de esta variable se establece calculando el Error de Temperatura (ET), sobre los límites del rango de operación. De esta manera se tiene que:

$$ET \in [-10 \text{ °C}, 5 \text{ °C}]$$

- *Dirección del Error (DE):* definida como Error actual (Eac), menos Error anterior (Ean), ecuación (2).

$$DE = Eac - Ean \quad (2)$$

Esta variable es muy importante porque señala cual es el comportamiento de la temperatura interna del invernadero, si este valor es negativo significa que la temperatura aumenta y si es positivo es porque la temperatura está disminuyendo. El Universo de Discurso de esta variable es de [-1, 1], el cual se estableció haciendo una interpolación de los datos obtenidos en el estudio sobre modelamiento climático en un invernadero realizado por Ruiz et al., [9].

- *Identificación de las variables de salida.* El control difuso establece como resultado la velocidad de giro de los ventiladores, la cual en este caso se expresa como un porcentaje del máximo rendimiento de los mismos. Por lo tanto, como variable de salida se tiene la Velocidad (V) y su Universo de Discurso corresponde al rango [0 %, 100%], donde 100% corresponde a la máxima velocidad que puede girar el ventilador.
- *Definición de las variables lingüísticas.* Las variables lingüísticas y sus conjuntos difusos asociados son:
  - La Figura 3, muestra los términos lingüísticos asociados a la variable ET: Error Negativo Máximo (ENM), Error Negativo Grande (ENG), Error Negativo Pequeño (ENP), Error Cero (EC) y Error Positivo Pequeño (EPP).
  - La Figura 4, muestra los términos lingüísticos asociados a la variable DE: Dirección Negativa (DN), Dirección Cero (DC) y Dirección Positiva (DP).
  - La Figura 5, muestra los términos lingüísticos asociados a la variable V: Baja Velocidad (BV), media Velocidad (mV), Alta Velocidad (AV) y Máxima Velocidad (MV).

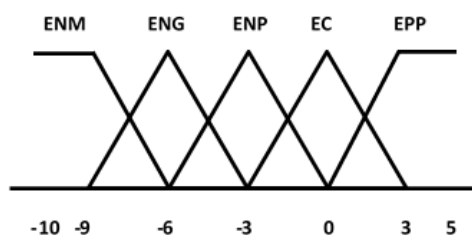


Figura 3. Términos lingüísticos asociados a la variable ET

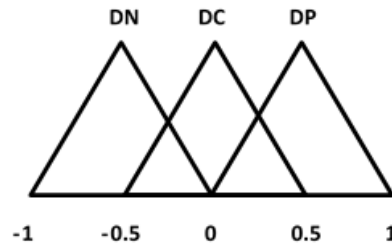


Figura 4. Términos lingüísticos asociados a la variable DE

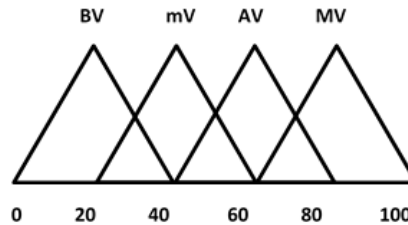


Figura 5. Términos lingüísticos asociados a la variable V

- *Definición de las reglas de control.* La base de conocimiento se estructuró a partir de un sistema de reglas difusas tipo Mandami, es decir premisas de la forma Si Error de Temperatura (ET) y Dirección del Error (DE) entonces Velocidad (V). En la Tabla 1 se muestra el conjunto de reglas que se estableció, los encabezados de las filas y las columnas son los términos lingüísticos ya definidos que muestran las combinaciones posibles de ET y DE, y los cruces representan las decisiones de salida [10]

Tabla 1. Reglas de control

	DN	DC	DP
ENM	MV	MV	AV
ENG	MV	AV	mV
ENP	AV	mV	BV
EC	mV	BV	BV
EPP	mV	BV	BV

- *Defusificación.* Como resultado de aplicar el conjunto de reglas difusas se obtiene un conjunto difuso a partir del cual se debe establecer un valor representativo, para ello se hace el cálculo del centro de gravedad [11], el cual se muestra en la ecuación 3 y en este caso corresponde al porcentaje de velocidad que deben tener los ventiladores del sistema.

$$\%V = \frac{\sum \mu(x)x}{\sum \mu(x)} \quad (3)$$

- *Implementación.* El sistema de control se implementó en una tarjeta Arduino Mega 2560, se utilizaron 8 sensores de temperatura DHT22, que se distribuyeron en el invernadero y 4 ventiladores para producir la corriente de aire.

### 3.4 Pruebas de Validación

Las pruebas de validación se hicieron en dos escenarios: en laboratorio y en campo. En laboratorio se probó que ha determinada temperatura se obtiene una velocidad de giro de los ventiladores de acuerdo a las reglas de control establecidas en la Tabla 1. Parea ello se simularon diferentes temperaturas, se calculó la variable ET, se establecieron valores para DE y se obtuvieron los resultados para cada pareja de variables. La Tabla 2 muestra estos datos.

Tabla 2. Pruebas en laboratorio

Tr	Ta	ET	DE	V	Observaciones
25	22	3	0.2	20	Baja velocidad
25	27	-2	-0.2	41	Alta velocidad
25	30	-5	-0.2	61	Media velocidad
25	35	-10	-0.2	80	Máxima velocidad

Para hacer las pruebas en campo, el sistema se instaló en una finca cafetera ubicada en el municipio de Buesaco, departamento de Nariño. Se tomaron datos de la temperatura interna del invernadero durante un mes para observar el comportamiento del sistema. La Figura 6 muestra las variaciones de la temperatura interna que se midieron en tres días diferentes.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas que se realizaron en laboratorio muestran que el control difuso funciona de acuerdo a lo establecido en las reglas de control de esta manera se tiene una velocidad de giro de los ventiladores de acuerdo al nivel de la temperatura interna del invernadero.



Las pruebas de campo son importantes porque demuestran que se logra evitar que la temperatura interna supere los 35 °C, es decir con este sistema el caficultor no corre riesgos de que su producto se deteriore por exceso de temperatura durante el secado del café.

Este resultado también es importante porque de alguna manera libera al caficultor de un problema que para controlarlo lo obligaba a estar mucho más pendiente del invernadero secador dedicando un tiempo que es muy valioso en las actividades del campo.

De igual manera es importante destacar que el control de la temperatura interna del invernadero es eficiente porque el proceso inicia mucho antes de llegar a la temperatura tope, a los 20 °C se inicia el proceso de control, poco a poco evacua aire caliente, en la misma medida ingresa aire fresco razón por la cual en las pruebas que se hicieron nunca se llegó a los 35°C.

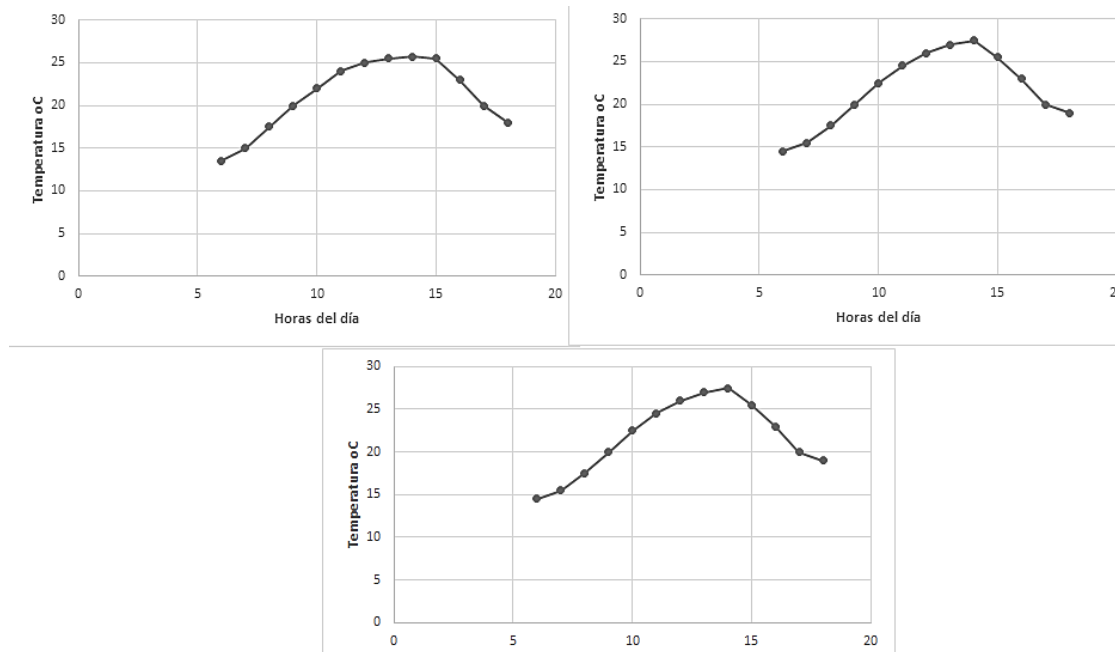


Figura 6. Comportamiento de la temperatura interna en las horas del día

## 5. CONCLUSIONES

Este sistema experto logra controlar la temperatura interna del invernadero solar utilizado para secar café, evitando de esta manera afectar la calidad de taza lo cual significa asegurar un buen producto en esta operación del beneficio del café mediante el uso de la tecnología.

La experticia del sistema se expresa cuando de manera permanente se monitorea el comportamiento de la temperatura interna y de acuerdo a ello se toman decisiones relacionadas con la mayor o menor velocidad de los ventiladores para forzar el mayor o menor ingreso de aire fresco a fin de mantener la temperatura interna en unos niveles adecuados.

Con este desarrollo tecnológico se facilita de manera significativa la labor del caficultor en el proceso de beneficio del café, porque lo libera de una actividad muy rutinaria, que pone en riesgo la calidad del producto y que además es mu y poco productiva.

## REFERENCIAS

- [1] FNC-Cenicafé (2013). Manual del cafetero colombiano. Federación Nacional de Cafeteros, Tomo III, pp. 50-53.
- [2] López, E. (2006). Secado de café en lecho fluidizado. *Revista Ingeniería e Investigación* 26(1), 25-29.
- [3] Parra, A., Roa, G. & Oliveros, C. (2008). SECAFE Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12(4), 455-427.
- [4] DNP (2007). Agenda interna para la Productividad y la Competitividad. Departamento Nacional de Planeación. Documento Regional Nariño.
- [5] Cámara de Comercio de Pasto (2012). Plan Estratégico Departamental de CTeI de Nariño. Cámara de Comercio de Pasto.
- [6] Hernández, W. et al. (2013). Optimización del secado de granos de café en un secador rotatorio. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 12(2), 315-325.
- [7] Esparza, C. & Núñez, R. (2014). Controlador adaptativo PD por modelo de referencia para una mesa vibratoria viaxial basada en el mecanismo biela-manivela. *Información Tecnológica* 25(2), 189-202.
- [8] Pérez, E., Ramírez, V. & Peña, A. (2016). Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM* 89, 23-40.
- [9] Ruiz, F. & Cotrino, C. (2010). Identificación de un modelo del clima en un invernadero mediante métodos por subespacios. *Ingeniería e Investigación* 30(2), 157-167.
- [10] Moreno, L., Peralta, E. & Morales, M. (2016). Control difuso para un convertidor CD-CD bidireccional de medio puente. *Ingenio Magno* 7(1), 116-132.
- [11] Jiménez, R., Aviles, O. & Ramos, O. (2013). Análisis de la implementación de un controlador difuso sobre diferentes arquitecturas de hardware. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 23(1), 77- 87.

# Inclusión de las energías renovables en el currículo de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Quindío

Jorge A. Aldana G.<sup>1</sup>  
Alexander Vera T.<sup>2</sup>  
César A. Álvarez G.<sup>3</sup>  
Wilmer D. Jiménez T.<sup>4</sup>  
Alejandro Herrera U.<sup>5</sup>  
Universidad del Quindío  
Armenia – Colombia

Las energías renovables ofrecen una oportunidad de mejora en el currículo del programa de Ingeniería electrónica de la Universidad del Quindío, por ello se analizó un modelo de inclusión, en el contexto del pensamiento de la sostenibilidad, orientado al aprovechamiento de los recursos de la Sexta Ola de Innovación Tecnológica (SOIT), donde se encontró un soporte en las energías renovables como parte de la materia prima para este fin. Por ello, se utilizó un modelo de análisis que utiliza la gestión de interesados de la gerencia de proyectos y de análisis formal de conceptos, a través de sus implicaciones y asociaciones, buscando la alineación de los elementos del Proyecto Educativo de Programa (PEP) con la primera idea de soporte para la SOIT, a través de la cual se evidenció una participación de las del 41% de los elementos del PEP ella. El proceso de inclusión curricular de esta propuesta, muestra una participación de las energías renovables en un 47% del soporte ofrecido por la primera idea del pensamiento en la SOIT, dejando abierto una abanico de oportunidades de mejora y propuestas innovadoras para los espacios académicos del programa, con el propósito de abanderar las energías renovables como un elemento director en actividades pedagógicas y conceptuales en la formación de Ingenieros Electrónicos, impulsando con la reglamentación actual, incursiones iniciales de mejora apoyadas en el aprovechamiento de las aplicaciones de la energía fotovoltaica para entornos locales y nacionales.

## 1. INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico de la humanidad puede ser observado en ciclos económicos y técnicos llamados olas de innovación tecnológica [1]. Estos ciclos evidencian la innovación como un pilar de crecimiento económico y desarrollo tecnológico, marcando una tendencia soportada en la combinación de sostenibilidad y productividad de los recursos para los próximos años. [2]Esta tendencia se soporta en los escritos de Kondratieff [3] donde, en 1920, promulgó las primeras cinco olas de innovación, como ciclos de la economía al corto, medio y largo plazo. En los años 40, Schumpeter [4] retomó las ideas antes expuestas y las convirtió en dinámicas económicas reconocidas. Éstas poseen dos características fundamentales: años de duración y rompimiento de la aplicación de una tecnología particular. Los años de duración se miden desde el momento en que una tecnología soluciona un problema, hasta cuando es reemplazado por otra, disruptiva.

Según los escritos de Schumpeter[2] se pueden distinguir cinco olas de innovación. La primera ola incluye el auge de la industria del hierro y los textiles. La segunda, se caracteriza por la masificación del uso de la máquina de vapor y el acero, con aplicaciones industriales y domésticas. La tercera, muestra la inclusión de la ciencia moderna en el ciclo económico, con el impulso de la electricidad, la química y los motores a combustión interna. La cuarta, se caracterizó por la explotación de productos petroquímicos, la aparición de la electrónica, la aviación y la carrera aeroespacial. Finalmente, la quinta ola se entiende a partir del surgimiento de las redes digitales, la biotecnología, el desarrollo de software y las tecnologías de información y comunicación (TIC).

En la última década y a partir del fenómeno de cambio climático y sobrepoblación, las Universidades de Adelaide, Curtin, Queensland y Griffith, propusieron el surgimiento de una nueva ola de innovación. [2]. Esta propuesta se especializa en el desarrollo de tecnologías sostenibles como la Bioquímica, nanotecnología verde, energías renovables y productividad de los recursos. Para Moody y Nogrady [1], esta sexta ola, deberá seguir cinco pilares fundamentales. El primer pilar propone el lema: “Residuos igual a oportunidad”. El segundo pilar enuncia: “Vender el servicio y no el producto”. El tercero, por su parte, promueve la “Convergencia de lo digital y lo natural”. El cuarto pilar sostiene que “Los bits son globales y los átomos locales”. Por último, el quinto pilar traza un camino de avance verde, con el precepto: “en caso de duda, observar la naturaleza”.

Aplicaciones disciplinares como la eficiencia energética, las energías renovables y la incursión de la gestión de residuos eléctricos y electrónicos en las regiones, abarcan el primer elemento del pensamiento de la SOIT: “Residuos = oportunidad”, por el enfoque del aprovechamiento de los residuos energéticos en los sistemas, como una oportunidad para el crecimiento y desarrollo sostenible. Las olas de innovación se impulsan por la investigación

---

<sup>1</sup> [jaldana@uniquindio.edu.co](mailto:jaldana@uniquindio.edu.co)

<sup>2</sup> [avera@uniquindio.edu.co](mailto:avera@uniquindio.edu.co)

<sup>3</sup> [caalvarez@uniquindio.edu.co](mailto:caalvarez@uniquindio.edu.co)

<sup>4</sup> [wjjimenez@uniquindio.edu.co](mailto:wjjimenez@uniquindio.edu.co)

<sup>5</sup> [alejandroherrera@uniquindio.edu.co](mailto:alejandroherrera@uniquindio.edu.co)

realizadas por las Universidades y centros de investigación alrededor del mundo. Colombia, se adhiere a la sexta ola por medio de la investigación liderada por Colciencias en temas como, energías renovables, inteligencia artificial, ingeniería de software, entre otros. Esta, a su vez, ofrece una ruta de conocimiento para las universidades, como en el caso de la Universidad del Quindío, con su programa de Ingeniería Electrónica, que busca a través de su PEP incursionar en la innovación tecnológica para generar valor agregado al interior de la comunidad académica.

El programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Quindío, a partir del referente mencionado anteriormente, busca analizar el impacto de tecnologías vanguardistas, para generar oportunidades de crecimiento en el país y el mundo, en conexión con en este nuevo ciclo tecnológico, con énfasis en las energías renovables. Cabe reiterar que en este capítulo se revisa la inclusión de las energías renovables como un elemento de la primera idea de la SOIT, Residuos = Oportunidad, en el contexto del programa de Ingeniería Electrónica a partir de un modelo de análisis utilizando el Análisis Formal de Conceptos (Formal Concept Analysis, FCA) [5], y la gestión de interesados (Stakeholders) que promulga en el PMBOK®.

Finalmente, estos resultados proponen retroalimentar el camino que se está construyendo para elaborar propuestas pedagógicas y conceptuales, como base del proyecto de investigación “Sistema de entrenamiento en energía fotovoltaica”, que desarrolla el grupo ELECTRAE (Electrónica Aplicada y Energías) adscrito al programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Quindío, encontrando elementos que abarquen respuestas a la pregunta: *¿Cómo suplir las necesidades pedagógicas de apropiación del conocimiento en aplicación de energía fotovoltaica?*

## 2. MÉTODO

Esta investigación se soporta en el análisis de cinco ideas base del pensamiento de la sexta ola de innovación, con elementos fundamentales como el Proyecto Educativo del Programa (PEP), el cual abarca la estructura académica del mismo, junto a otros elementos como la malla curricular CDIO, los perfiles de los graduados, los estándares CDIO y sus acciones estratégicas enfocadas en la docencia, investigación, extensión y proyección social. A través de la metodología propuesta en el trabajo de grado “Análisis de la incorporación del programa de ingeniería electrónica de la Universidad del Quindío en las olas de innovación tecnológica, se adelanta una análisis basado en cuatro pasos, soportado el modelo en cascada (Figura 1), según [6].

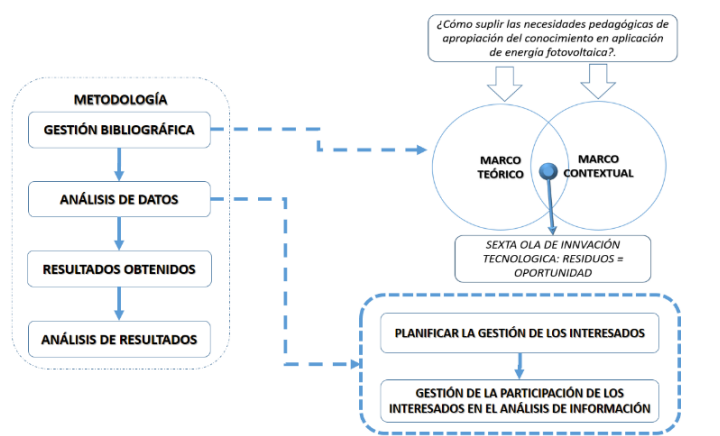


Figura 29. Metodología utilizada [7]

### 2.1 Gestión Bibliográfica

La gestión bibliográfica (Figura 2) se realizó como punto de partida de dos frentes, el marco conceptual relacionado con la innovación tecnológica y el marco contextual. Ese proceso concluiría con una estrategia para definir las bases de un modelo de análisis.

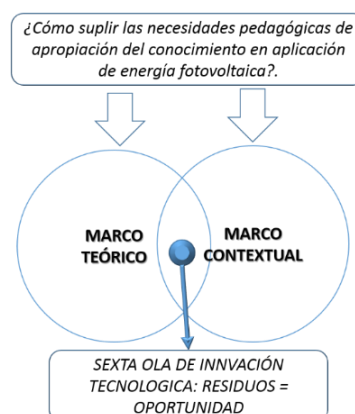


Figura 30. Búsqueda bibliográfica [7]

El marco contextual se enfoca en el conocimiento y la utilidad que frecen las energías renovables en los sectores económicos y educativos de Colombia, un país en el que la demanda de conocimiento en esta área está creciendo aceleradamente, más no así la oferta, creándose una necesidad académica en el mercado nacional, a todos los niveles.

En la Universidad del Quindío, se ha conformado el grupo de investigación en Electrónica Aplicada y Energías ELECTRAE, con una de sus líneas de investigación orientada al estudio de las energías renovables [8]. En este orden de ideas, cabe decir que se observa la necesidad de capacitación a nivel básico y avanzado para enlazar el conocimiento en este campo con la aplicación en el entorno, por lo cual la implementación de estas temáticas (energías renovables), soportadas con módulos para la implementación de laboratorios, se hace indispensable para afianzar conceptos de eficiencia energética, energías limpias, y enfoque sistémico en el aprovechamiento de los recursos y las salidas generadas en procesos de transformación.

Así mismo, este marco muestra la tecnología didáctica [9] como una puerta de entrada para la relación entorno-energías renovables, mercado en el que empresas españolas, para citar solo un ejemplo, han apostado a este tipo de módulos de entrenamiento en los que se encuentran integradas, energía fotovoltaica, producción y procesamiento de la energía solar, por un valor de los US\$25.000 [10].

Empresas como Festo, con la línea educativa Lab-Volt, ofrecen módulos de entrenamiento, en los que, además de la energía solar, involucran la eólica. Sin embargo, los precios son superiores al citado anteriormente [11]. USDidatic [10] es otra de las industrias que han implementado kits para entrenamientos de este tipo, pese a lo cual no se encuentran en el mercado módulos didácticos que contemplen cambios de características climáticas, radiación solar y ajustes de localización global de la zona. El marco conceptual surge a partir de la búsqueda de información referente a la innovación tecnológica y su relación con ciclos económicos. Es importante el análisis de estos ciclos u olas de innovación tecnológica, revisando autores como Kondratiev y Schumpeter, quienes están de acuerdo en que se han definido cinco olas que han apoyado el desarrollo económico de los países y regiones.

Actualmente, la sexta ola se presenta como el actual ciclo económico, según Moody [1], con un énfasis fuerte en la sostenibilidad aplicada a disciplinas como la química verde, el diseño holístico y las energías renovables, entre otros, para fomentar el desarrollo de las regiones. La siguiente información apoya el pensamiento de la sexta ola a través cinco grandes ideas:

- El reciclaje como oportunidad: La búsqueda de residuos en un sistema genera oportunidades porque vivimos en un mundo de recursos limitados.
- Vender el servicio no el producto: Es más importante el cambio hacia el servicio para consumir de manera sostenible.
- Converge lo natural con lo digital: Los dispositivos comparten información y no solo se limitan a realizar funciones individuales.
- Los bits son globales lo átomos son locales: los negocios se deciden según el tamaño del mercado, el mercado del tangible lleva un pensamiento local, los intangibles se conectan generando información y un pensamiento global para vender, abriendo camino a la concepción de servicios.
- En caso de duda observar la naturaleza: La naturaleza nos enseña estrategias que han llevado a la evolución desde hace millones de años en la productividad del uso de recursos limitados.

De estas cinco ideas, la idea uno (el reciclaje como oportunidad) presenta un soporte en las energías renovables, la eficiencia energética y la gestión de residuos eléctricos y electrónicos, por el énfasis en la productividad o en la gestión de los recursos limitados presentes en el entorno. Esta idea será fundamental para la segunda etapa donde se analizará la inclusión de las energías renovables en el programa de Ingeniería Electrónica, a través de la SOIT, por medio de un modelo que parte de la gestión de proyectos (análisis de interesados) y el análisis formal de conceptos (FCA). El soporte teórico para los análisis y resultados obtenidos en las etapas posteriores tienen como fundamento la eficiencia energética, las energías renovables y los residuos electrónicos. Así, la Idea uno se soporta en los siguientes contextos bibliográficos:

- Eficiencia energética[12].
- Energías renovables [13].
- Residuos Electrónicos [14]).

Realizando un cruce entre los marcos, según la figura 2, se obtiene una estrategia general encaminada en encontrar elementos que respondan a la siguiente pregunta: *¿Cómo suplir las necesidades pedagógicas para la apropiación del conocimiento en aplicaciones de energía fotovoltaica?*

## 2.2 Modelo para analizar los datos

La Figura 31, muestra el modelo para realizar el análisis de datos, el cual inicia con la identificación de los actores interesados de la comunidad académica del programa de Ingeniería Electrónica, en determinar las relaciones existentes entre el contexto del programa y la sexta ola, para lo cual, se adoptó la gestión de interesados de la guía del PMBOK®.

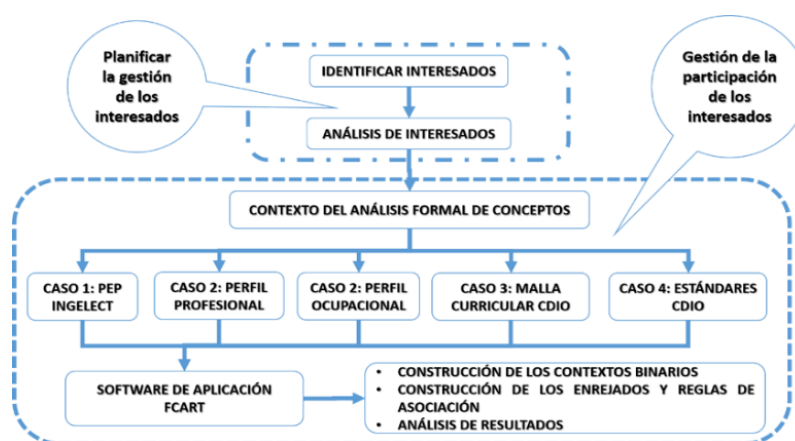


Figura 31. Modelo para analizar los datos

La elección de los interesados se realizó según la clasificación de la matriz de poder/interés y el organigrama del programa de Ingeniería Electrónica establecido en su PEP [15], considerando los siguientes criterios para la ponderación de los mismos:

*Poder*: (Rango: 1=BAJO hasta 5=ALTO) Nivel de autoridad o capacidad para influir en cambios a las variables críticas del programa de Ingeniería Electrónica (Consejo de Facultad, Consejo Curricular, Dirección de Programa, Claustro Profesor, etc.).

*Interés*: (Rango 1=BAJO hasta 5=ALTO) Nivel de preocupación con respecto a los resultados del proyecto.

En la Tabla 21, se observan los interesados más relevantes que se encontraron en el programa de Ingeniería Electrónica (análisis de interesados).

Tabla 21. Ponderación poder/interés programa de Ingeniería Electrónica

Nivel autoridad	Valoración poder	Valoración interés
Consejo Facultad	5	5
Consejo Curricular	5	5
Director de Programa	5	5
Comité Autoevaluación	4	5
Comité Trabajos de Grado	3	3
Comité Desarrollo Curricular	4	4
Claustro profesoral	2	4
Rama Estudiantil IEEE	2	4
AFE2	2	4
Líderes Grupos de Investigación	2	3

Para la planificación de la gestión los interesados en el análisis de datos, se realizó inicialmente la adaptación de las variables descritas en el Análisis Formal de Conceptos (FCA). Este modelo se basa en una relación entre el conjunto de objetos que pertenecen a un concepto (extensión) y los atributos compartidos por ellos (intención). Se determinan para cinco casos unos objetos específicos, estos serán elementos del PEP, como las acciones estratégicas y directrices (CASO1); la malla curricular (caso 2); el perfil profesional (caso 3) y ocupacional (caso 4) de los graduados, así como los estándares CDIO (Conceiving, Designing, Implementing, Operating) (caso 5) y sus atributos, con tres elementos base de la idea, uno del pensamiento de la sexta ola.

La meta principal es obtener reglas de asociación (implicaciones y asociaciones) para determinar la incorporación (inserción) en el programa de Ingeniería Electrónica de las energías renovables en las olas de innovación tecnológica para un posterior análisis de resultados. Finalmente, en esta planificación se distribuyó la participación de los interesados en la construcción del contexto formal según se observa en la Tabla 22.

Tabla 22. Ponderación poder/interés, programa de Ingeniería Electrónica

Interesados consultados (líderes) para cada caso (contexto)	
Interesados	Caso consultado
Consejo Facultad	CASO 1, CASO 2
Consejo curricular	CASO 1, CASO 3
Director de Programa	CASO 1, CASO 2
Comité Autoevaluación	CASO 1, CASO 3, CASO 4, CASO 5
Comité de Desarrollo Curricular	CASO 2, CASO 5
Rama Estudiantil IEEE	CASO 3, CASO 4
AFE2	CASO 3, CASO 4
Representante Graduados	CASO 3, CASO 4

Con esta información se procede a realizar tablas para construir los contextos formales para cada uno de los casos, con unas preguntas orientadoras y los interesados relacionados para cada uno de los casos. Este procedimiento se observa en la Figura 32 y es el método usado para controlar la participación de los interesados.

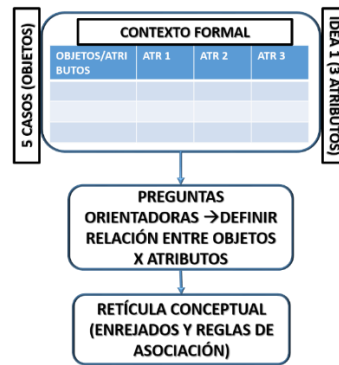


Figura 32. Método para la gestión y participación de los interesados

### 3. RESULTADOS

Se realizó un análisis con cinco casos, generándose grandes construcciones de conceptos y enrejados (lattices) a través de conectores. Guiados por una serie de preguntas orientadoras, se llevó a cabo una revisión de la existencia de una relación con cada atributo. Cada interesado diligenció las tablas asignadas soportadas en el modelo de la Figura 32. Luego, se realizó un cruce de tablas con cada interesado y la determinación, si las relaciones binarias existían para establecer una relación entre el objeto y los atributos, con el fin de obtener un resultado final que determine la inclusión del programa de Ingeniería Electrónica en el campo las energías renovables de la sexta ola.

Finalmente, se utilizaron las reglas que presentan más soporte en las mencionadas relaciones, así mismo, la confianza es el porcentaje de esos objetos que cumplen relaciones específicas con los atributos (consecuentes (C)) [16]. De este proceso se obtuvieron reglas de asociación, que se interpretan de la siguiente manera: un conjunto A->C con un soporte del 10% y una confianza del 40%, significa que cuando A aparece, el 10% de las veces C también aparece; además, que A y C están apareciendo juntos en el 40% de los casos.

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis entrelazó los resultados que se encontraron en la sección 4, con información de la base teórica y contextual. Para ello, se revisaron las reglas de asociación y las tablas de relación para encontrar las ideas que más relación tiene con los objetos de los cinco casos modelados, construyendo para cada caso unas reglas de asociación con interpretación en los conceptos desarrollados. Esto se realizó con el software FCART, obteniendo las relaciones de los cinco casos como se observa en la Figura 1. Para la obtención de los resultados se utilizó MS Excel®, donde, se diligenciaron las tablas con los contextos formales en los que se utilizó el software FCART [17] de la Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables de la Universidad de Moscú, para realizar el análisis formal de conceptos, donde se encontraron importantes evidencias en cinco casos.

#### 4.1 Caso 1: PEP (directrices y acciones estratégicas)

En este contexto formal (Tabla 23) se utilizó una relación binaria entre las acciones estratégicas del PEP y las 3 bases de la idea 1 del pensamiento de la sexta ola, con el que se inició el diligenciamiento individual de cada interesado consultado en este caso. Utilizando el criterio de la función piso según la ecuación (1).

$$[2,5] = \min\{k \in Z \mid 2.5 \leq k\} = 2,5 \quad (1)$$

Se estableció un criterio de la existencia de una relación entre cada objeto y atributo de los 5 interesados como mínimo en un 50%, es decir, "Si existe una relación entre un objeto y dos o más características de la idea 1 (atributo) en cada tabla del interesado, entonces existe una relación, en caso contrario, no existe". La consecuencia de la aplicación de este criterio es el contexto formal representado en una tabla (Tabla 24) el cual arroja unas reglas de asociación que interpretan el diagrama de enrejados (Figura 29), por medio del software FCART. Utilizaremos las tablas en los demás casos para interpretaciones.

Tabla 23. Contexto formal caso 1

PEP INGELECT 2016 [15]	Primera idea		
	Eficiencia energética	Energías Renovables	Gestión de residuos eléctricos y electrónicos
V (visión programa)	X	X	X
M (misión programa)	X	X	X
P1 (Acción estratégica 1)	X	X	X
P2 (Acción estratégica 2)	X	X	X
P3 (Acción estratégica 3)			
P4 (Acción estratégica 4)			
P5 (Acción estratégica 5)			
P6 (Acción estratégica 6)			
P7 (Acción estratégica 7)			
P8 (Acción estratégica 8)	X	X	

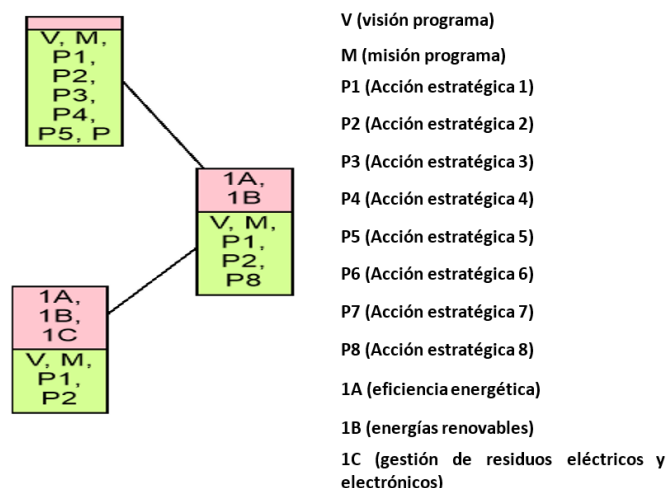


Figura 33. Diagrama de enrejados para el caso 1 [17]

Las reglas de asociación más importantes fueron las que presentaban alto soporte encontrándose en este caso lo que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 24. Reglas de asociación obtenidas con FCART caso 1

Reglas de asociación	Soporte	Confianza	Resultado	Interpretación
{1, 2} -> {1, 2, 3}	40%	80%	Cuando aparecen los atributos {1} y {2}, el 40% de las veces aparece el atributo {3}. Todos juntos aparecen el 80% de las veces.	El 40% del PEP interactúa con los conocimientos de eficiencia energética {1} y energías renovables {2}; sin embargo, el 80% interactúan también con los gestión de residuos eléctricos y electrónicos {3}.

En este contexto formal se obtuvo la siguiente información (Tabla 5) acerca de las relaciones entre variables (objetos y atributos).

Tabla 25. Relaciones en el contexto de las acciones estrategias y directrices del PEP

PEP INGELECT 2016	Eficiencia energética	Energías Renovables	Gestión de residuos eléctricos y electrónicos
¿Cuántas variables no fueron relacionadas en el contexto?	25	25	27
¿Cuántas variables fueron relacionadas en el contexto?	15	15	13

#### 4.2 Caso 2: Malla Curricular

En este contexto formal (Tabla 28) se utilizó una relación binaria entre los núcleos de formación de la malla curricular CDIO[15] y los 3 ejes de la idea 1, donde inició con el diligenciamiento individual de cada interesado consultado en este caso. Utilizando el criterio de la función piso según la ecuación (2). Este criterio aplica para los casos 3, 4 y 5.

$$\lfloor 2 \rfloor = \min\{k \in Z \mid 2 \leq k\} = 2 \quad (1)$$

Se estableció un criterio de la existencia de una relación entre cada objeto y atributo de los 4 interesados como mínimo en un 50%, este criterio se utilizó para determinar un contexto global de las relaciones entre cada núcleo y las ideas como atributos. La regla de asociación (Tabla 26) más importantes fueron las que presentaban alto soporte encontrándose en este caso:

Tabla 26. Reglas de asociación obtenidas con FCART caso 2

Reglas de asociación	Soporte	Confianza	Resultado	Interpretación
{2, 3} -> {1, 2, 3}	76%	71%	Cuando aparecen los atributos 2 y 3, el 76% de las veces aparecen el atributo 1. Todos juntos aparecen el 71% de las veces.	Cuando los conocimientos de energías renovables {2} y gestión de residuos eléctricos y electrónicos {3} se manifiestan sobre la malla curricular, el 76% de las veces lo harán con el concepto de eficiencia energética. El 71% de los espacios académicos que conforman la malla curricular se dirigen sobre la totalidad de las disciplinas que soportan la primera idea de la sexta ola de innovación tecnológica.

En este contexto formal se obtuvo la siguiente información (Tabla 8) acerca de las relaciones entre variables (objetos y atributos)

Tabla 27. Relaciones en el contexto de la malla curricular

Malla curricular	Eficiencia energética	Energías Renovables	Gestión de residuos eléctricos y electrónicos
¿Cuántas variables no fueron relacionadas en el contexto?	147	158	205
¿Cuántas variables fueron relacionadas en el contexto?	117	106	59



**Tabla 28.** Contexto formal caso 2

MALLA CURRICULAR (NFG: Núcleo de formación general, NFP: Núcleo formación personal, NF: Núcleo Facultad, CDIO: núcleo CDIO, NBIE: Núcleo Básicas de Ingeniería Electrónica, NE: Núcleo Electrónica, NSD: Núcleo sistemas digitales, NAC: Núcleo Automatización y Control, NT: Núcleo Telecomunicaciones, P: Profundizaciones, EP: Electiva Profesional, NA: Núcleo Administración, TG: Núcleo Trabajos de Grado.	Primera Idea		
	Eficiencia energética	Energías Renovables	Gestión de residuos eléctricos y electrónicos
NFG1 (Uniquindianidad)			
NFG2 (Inglés I)			
NFG3 (Inglés II)			
NFG4 (Cátedra Multidisciplinar)		x	x
NFP1 (TIC)			
NFP2 (Actividad Física)			
NFP3 (Educación Financiera)			
NFP4 (Emprenderismo)			
NFP5 (Hábitos y Estilos de Vida Saludables)			
NFP6 (Gestión del Riesgo de Desastres)			
NF1 (Matemáticas Generales)			
NF2 (Lectura y Escritura en Ingeniería)			
NF3 (Ética Profesional)			
NF4 (Seminario de Ingeniería)			
NF5 (Administración)			
CDIO1 (Introducción a la Ingeniería Electrónica)	x	x	
CDIO2 (Taller de Creatividad e Innovación)	x	x	
CDIO3 (Diseño I)	x	x	x
CDIO4 (Diseño II)		x	x
CDIO5 (Proyecto CDIO I)	x	x	
CDIO6 (Proyecto CDIO II)	x	x	
CDIO7 (Proyecto CDIO III)	x	x	x
NBIE1 (Cálculo Diferencial)			
NBIE2 (Cálculo Integral)			
NBIE3 (Ecuaciones Diferenciales)			
NBIE4 (Álgebra Lineal)			
NBIE5 (Mecánica)			
NBIE6 (Dibujo Lineal)			
NBIE7 (Lógica de Programación)			
NBIE8 (Programación)			
NBIE9 (Cálculo Vectorial)			
NBIE10 (Electromagnetismo)			
NBIE11 (Campos y Ondas)			
NBIE12 (Señales y Sistemas)			
NBIE13 (Procesos Estocásticos)			
NE1 (Circuitos I)			
NE2 (Circuitos II)			
NE3 (Electrónica I)	x		
NE4 (Electrónica II)	x		
NE5 (Electrónica de RF)	x		
NE6 (Instrumentación)	x	x	
NE7 (Electrónica Industrial)	x	x	
NSD1 (Sistemas Digitales I)	x		
NSD2 (Sistemas Digitales II)	x		
NAC1 (Sistemas de Control Automático I)			
NAC2 (Sistemas de Control Automático II)	x		
NT1 (Telemática)			
NT2 (Sistemas de Telecomunicaciones I)	x		
NT3 (Sistemas de Telecomunicaciones II)	x	x	
P1 (Comunicaciones inalámbricas)			
P2 (Control Avanzado)			
P3 (Control de Procesos)		x	
P4 (Control no lineal)			
P5 (Diseño Digital Avanzado)	x	x	
P6 (Procesamiento Digital de Señales)			
P7 (Redes y Servicios de Telecomunicaciones)			
P8 (Sistemas embebidos)			
P9 (Tecnologías de Redes WAN)			
EP1 (Electiva Profesional I)			
EP2 (Electiva Profesional II)			
NA1 (Evaluación de Proyectos)	x		
NA2 (Legislación Laboral y Propiedad Intelectual)			
NA3(Gestión Empresarial)		x	
TG1 (Investigación en Ingeniería)	x	x	x
TG2 (Trabajo de Grado I)	x	x	x
TG3 (Trabajo de Grado II)	x	x	x

### 4.3 Caso 3: Perfil Profesional

Utilizando el criterio de la función piso con el mismo soporte de caso 2. Se estableció un criterio de la existencia de una relación entre cada objeto y atributo de los 4 interesados como mínimo en 50%, este criterio se utilizó para determinar un contexto formal (Tabla 9) de las relaciones entre los elementos del perfil y los de la primera idea.

**Tabla 29.** Contexto formal caso 3

Perfil profesional (K1..K6: competencias; C1....C9: conocimientos)	Primera Idea		
	Eficiencia energética	Energías Renovables	Residuos eléctricos y electrónicos
K1 (Diseño de circuitos electrónicos)			
K2 (Diseño en ingeniería basado en la satisfacción de requerimientos)	X		
K3 (Modelado y simulación de fenómenos físicos)			
K4 Aplicaciones informáticas para la solución de problemas en electrónica.			
K5 (Concepción, diseño, implementación y operación de sistemas de telecomunicaciones, sistemas digitales, y sistemas de automatización y control)		X	
K6 (Emprenderismo, administración y evaluación de proyectos)			X
C1 (Identificar y solucionar problemas)		X	X
C2 (Diseñar sistemas electrónicos)		X	
C3 (Gestionar y formular proyectos con responsabilidad y ética)			
C4 (Aprender a lo largo de la vida autónomamente)			X
C5 (Transformar espacio de desempeño profesional en busca del bien común)		X	
C6 (Innovar con capacidad prospectiva para visionar los cambios relacionados con su profesión)		X	
C7 (Analizar y adaptar la tecnología existente a las necesidades del contexto)			
C8 (Trabajar en equipo en ambientes interdisciplinarios y colaborativos)			
C9 (Trabajar en grupos y proyectos de investigación)		X	

La regla de asociación (Tabla 30) más importantes fue las que presentaban alto soporte encontrándose en este caso.

**Tabla 30.** Reglas de asociación obtenidas con FCART caso 3

Reglas de asociación	Soporte	Confianza	Resultado	Interpretación
{ } -> {2}	40,0%	40%	El 40% del perfil profesional interactúa con el atributo 2.	El 40% de los conocimientos y capacidades que caracterizan el perfil profesional del Ingeniero Electrónico de la Universidad del Quindío, no contribuyen con la participación de las energías renovables {2} en el mismo. Esto sucede con el 40% de las disciplinas de la primer idea del pensamiento de la sexta ola de innovación tecnológica.

En este contexto formal se obtuvo la siguiente información (Tabla 11) acerca de las relaciones entre variables.

**Tabla 31.** Relaciones en el contexto del perfil profesional

Perfil profesional	Eficiencia energética	Energías Renovables	Gestión de residuos eléctricos y electrónicos
¿Cuántas variables no fueron relacionadas en el contexto?	38	28	40
¿Cuántas variables fueron relacionadas en el contexto?	22	32	20

### 4.4 Caso 4: Perfil Ocupacional

Utilizando el criterio de la función piso con el mismo soporte de caso 2. Se estableció un criterio de la existencia de una relación entre cada objeto y atributo de los 4 interesados como mínimo en un 50%, este criterio se utilizó para determinar un contexto formal (Tabla 32) de las relaciones entre cada elemento del perfil y de la primera idea.

**Tabla 32.** Contexto formal caso 4

Perfil ocupacional graduados Ingelect (D: Desempeño , C: cargos)	Primera Idea		
	Eficiencia energética	Energías Renovables	Gestión de residuos eléctricos y electrónicos
D1 (Diseñador de circuitos electrónicos)	X	X	X
D2 (Ingeniero de proyectos)	X		
D3 (Ingeniero de networking e infraestructura de comunicaciones)		X	
D4 (Ingeniero de redes de comunicaciones y tráfico)			
D5 (Ingeniero de automatización y control en la industria)	X	X	
D6 (Ingeniero de mantenimiento)			
D7 (Ingeniero de desarrollo de hardware y software para la solución de problemas del entorno)			
D8 (Generador de empresas de base tecnológica)			
C1 (Mandos operativos en el inicio de su ejercicio profesional o en ingeniería de ejecución)			
C2 (Mandos medios en alta gerencia y operatividad, contratista, supervisor y jefe de obra)			
C3 (Mandos altos como gerente y cargos que impliquen la toma de decisiones empresariales)			
C4 (Gestor de conocimiento y tecnologías)	X	X	
C5 (Consultor y asesor)		X	

La regla de asociación (Tabla 33) más importantes fueron las que presentaban alto soporte encontrándose en este caso.

**Tabla 33.** Reglas de asociación obtenidas con FCART

Reglas de asociación	Soporte	Confianza	Resultado	Interpretación
{2} -> {1, 2}	23,0%	60%	Cuando aparece el atributo 2, el 23% de las veces aparece el atributo 1. Todos juntos aparecen el 60% de las veces.	Cuando el desempeño del ingeniero electrónico se perfila sobre las energías renovables {2}, el 23% de las veces lo hará también sobre la eficiencia energética {1}. El 60% de los cargos que define el perfil ocupacional del Ingeniero electrónico se dirigen sobre las energías renovables {2} y la eficiencia energética{1}.

En este contexto formal se obtuvo la siguiente información (Tabla 14) acerca de las relaciones entre variables (objetos y atributos).

**Tabla 34.** Relaciones en el contexto del perfil ocupacional

Perfil Ocupacional	Eficiencia energética	Energías Renovables	Gestión de residuos eléctricos y electrónicos
¿Cuántas variables no fueron relacionadas en el contexto?	24	21	31
¿Cuántas variables fueron relacionadas en el contexto?	28	31	21

#### 4.5 Caso 5: Estándares CDIO

Utilizando el criterio de la Función piso con el mismo soporte de caso 2. Se estableció un criterio de la existencia de una relación entre cada objeto y atributo de los 4 interesados como mínimo en un 50%, este criterio se utilizó para determinar un contexto formal (Tabla 35) de las relaciones entre cada elemento de los estándares CDIO y los elementos de la primera idea.

**Tabla 35.** Contexto formal caso 5

Estándares CDIO	Primera idea		
	Eficiencia energética	Energías Renovables	Gestión de residuos eléctricos y electrónicos
E1 (Estándar 1 - CDIO como Contexto)	X	X	
E2 (Estándar 2 - Resultados del aprendizaje)		X	X
E3 (Estándar 3 - Currículo Integrado)	X		
E4 (Estándar 4 - Introducción a la Ingeniería)		X	
E5 (Estándar 5 - Experiencias Diseño implementación)	X	X	X
E6 (Estándar 6 - Espacios de trabajo de ingeniería)	X	X	X
E7 (Estándar 7 - Experiencias de Aprendizaje Integradas)	X	X	X
E8 (Estándar 8 - Aprendizaje Activo)	X	X	X
E9 (Estándar 9 - Fortalecimiento de las competencias de los académicos)	X	X	X
E10 (Estándar 10 - Mejora de la Competencias docentes de los académicos)	X		
E11 (Estándar 11 - Evaluación del aprendizaje)	X	X	
E12 (Estándar 12 - Evaluación del Programa)		X	

Las reglas de asociación (Tabla 36) más importantes fueron las que presentaban alto soporte encontrándose en este caso.

**Tabla 36.** Reglas de asociación obtenidas con FCART

Reglas de asociación	Soporte	Confianza	Resultado	Interpretación
{1, 2} -> {1, 2, 3}	42%	71%	Cuando aparecen los atributos 1 y 2, el 42% de los casos aparece el atributo 3. Todos aparecen un 71% de los casos. Todos aparecen un 71% de los casos	Cuando los estándares CDIO se perfilan sobre la eficiencia energética {1} y las energías renovables {2}, el 42% de las veces lo hará también sobre la gestión de residuos eléctricos y electrónicos {3}. El 71% de los estándares que conforman el marco de referencia CDIO presenta una relación directa con la idea de los residuos como una oportunidad para el desenvolvimiento de la Ingeniería Electrónica de la Universidad del Quindío.
{2, 3} -> {1, 2, 3}	42%	83%	cuando aparecen los atributos 2 y 3, el 42% de los casos aparece el atributo 1. Todos aparecen un 83% de los casos	Cuando los estándares CDIO se perfilan sobre las energías renovables {2} y la gestión de residuos eléctricos y electrónicos {3}, el 42% de las veces lo hará también sobre la eficiencia energética {1}. El 83% de los estándares que conforman el marco de referencia CDIO presenta una relación directa con la idea de los residuos como una oportunidad para el desenvolvimiento de la ingeniería Electrónica de la Universidad del Quindío.

En este contexto formal se obtuvo la siguiente información acerca de las relaciones entre variables (objetos y atributos):

**Tabla 37.** Relaciones en el contexto de los estándares CDIO

Estándares CDIO	Eficiencia energética	Energías Renovables	Gestión de residuos eléctricos y electrónicos
¿Cuántas variables no fueron relacionadas en el contexto?	14	13	17
¿Cuántas variables fueron relacionadas en el contexto?	10	11	7

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Caso 1: PEP Ingeniería Electrónica

De acuerdo a los resultados obtenidos, las reglas de asociación obtenidas en la Tabla 25, se encontró una inserción del 37,5% de las energías renovables en el PEP de Ingeniería Electrónica. Se observa una proporcionalidad entre la eficiencia energética y las energías renovables con las directrices y acciones estratégicas del PEP, ofreciendo una posibilidad de incursionar en el programa con acciones de mejora para potencializar y complementar el plan de mejoramiento 2016-2025.

La regla de asociación obtenida a partir del enrejado del contexto formal (Tabla 24) muestra una alineación con el entorno tecnológico que se proyecta en el programa de ingeniería electrónica del 40%, a través de la eficiencia energética y las energías renovables. Lo cual refleja, un abanico de posibilidad de establecer el proyecto educativo de programa como un puente entre la comunidad académica y el entorno, también muestra la proporcionalidad que ofrecen las directrices y políticas de la universidad del Quindío con el entorno, por la alineación que implica un Proyecto educativo de programa y las políticas de extensión, académicas e investigativas.

### 5.2 Caso 2: Malla curricular

De acuerdo a los resultados obtenidos con las reglas de asociación de la Tabla 27, se encontró una inserción del 40% de las energías renovables en la malla curricular del programa de Ingeniería Electrónica. Se destacan los siguientes aspectos:

- Proporcionalidad entre la eficiencia energética y las energías renovables en relación con la malla curricular.
- Un espacio para generar participación del contexto de las energías renovables en las líneas de profundización de la malla curricular y otros componentes transversales como los proyectos CDIO, los trabajos de grado, la ciencia básica y el área administrativa.
- Una posibilidad de análisis respecto a la relación entre el entorno y aspectos curriculares de una malla como: los contenidos, la evaluación, las competencias personales e interpersonales, entre otros.

La regla de asociación Tabla 26 obtenida en el contexto formal muestra una relación interesante del 71% de las energías renovables y la gestión de residuos eléctricos y electrónicos, ofreciendo una relación interesante para la investigación y el desarrollo como lo es el desarrollo de alternativas tecnológicas a través de la sostenibilidad.

### 5.3 Caso 3: Perfil Profesional

De acuerdo a los resultados obtenidos con las reglas de asociación de la Tabla 30, se encontró una inserción del 53% de las energías renovables en el perfil profesional del programa de Ingeniería Electrónica, sin complementarse con otro elemento de la primera idea. Se destacan los siguientes aspectos:

- La idea 1, con sus atributos, se muestra como un instrumento de medición a través de disciplinas proyectadas como opción del desarrollo y la innovación tecnológica (atributo 1a, atributo 1b, atributo 1c), para conocer las relaciones del Ingeniero electrónico a través de los conocimientos y competencias adquiridas en su formación.
- La poca relación que perciben los interesados líderes de disciplinas que soportan la sostenibilidad con el perfil profesional que los respalda como Ingenieros Electrónicos de la Universidad del Quindío.

La posibilidad, a través del perfil profesional, que tiene un Ingeniero Electrónico para incursionar en el entorno con las energías renovables (40% relación del perfil profesional con las energías renovables en la regla de asociación (Tabla 31)), deja abierta la posibilidad de tener en cuenta estas disciplinas del entorno de la sostenibilidad para ofrecer valor agregado a los Ingeniero Electrónicos de la Universidad del Quindío en afianzar sus competencias y conocimientos en las energías limpias.

### 5.4 Caso 4: Perfil Ocupacional

Según la Tabla 34 el desempeño del Ingeniero Electrónico se soporta en un potencial de un 59% sobre las energías renovables, dejándole la opción al graduado de incursionar en el campo laboral, como pieza clave de una organización que utilicen a través de la infraestructura de una empresa la optimización de recursos y optimización de procesos derivados de estas energía limpias. Por otro lado, la regla de asociación de la Tabla 33 muestra una percepción donde relaciona solo un camino (energías renovables) hacia temas modernos y que tendrán un peso importante en el futuro en aspectos tecnológicos, sociales, económicos y culturales como el aprovechamiento de los residuos y la eficiencia energética frente a la industrialización del conocimiento, mostrando un desconocimiento a otros conocimientos que podrían ser opciones de desarrollo como al eficiencia energética y la gestión de residuos.

## 5.5 Caso 5: Estándares CDIO

Según la Tabla 36 las energías renovables incursionan en un 45% con los estándares CDIO lo cual refleja una participación entre eficiencia, energías limpias y un marco de referencia para la educación en Ingeniería, donde se pueden generar ámbitos de enseñanza en espacios donde se promuevan, implementen y administre sistemas basados en energía limpia con una visión sustentable donde el Ingeniero en formación se proyecte como un recurso capaz de diseñar y operar tecnologías basadas en energías sostenibles. Las reglas de asociación según la Tabla 37, el 42% de las veces los estándares CDIO se apoyan en las energías renovables, lo cual representa una inserción de las mismas en el marco de referencia CDIO, estableciendo una línea de conocimiento joven en el programa para conformar proyectos en los elementos del PEP para incursionar en factores que generen valor agregado en el programa como la extensión, la proyección social y la conformación de redes.

## 6. CONCLUSIONES

Se encontró que la inclusión de las energías renovables en el currículo del programa de Ingeniería Electrónica fue de un 47% ofreciendo una oportunidad para la generación de estrategias de enseñanza para desarrollar proyectos donde se enfoque una línea de profundización en energías limpias. Además, se encontró en el proyecto educativo de programa una interacción del 40% con la eficiencia energética y las energías renovables, se recomienda afianzar esta relación al crear explícitamente una línea de trabajo en estos campos.

La gestión de residuos eléctricos y electrónicos interactúa en todos los casos analizados hasta un 80% de relación, esto sugiere aprovechar esta percepción de los líderes para realizar campañas pedagógicas y ambientales en la línea de la sostenibilidad descrita por la sexta ola, además se puede potencializar un enfoque de Emprenderismo con planes de negocio enfocados en el aprovechamiento de la disposición de estos residuos.

En el contexto referente a la malla curricular, se encontró una concordancia del 76%, entre la malla curricular y el concepto de la eficiencia energética, esto es alentador por cuanto muestra un interés implícito de los líderes en un tema de vital actualidad

Se evidenció una discrepancia entre los enunciados en el perfil profesional y el desempeño de energías renovables, si se tiene en cuenta el 47% de la relación con el proyecto educativo de programa, frente al 23% del perfil. Este fenómeno es un fuerte llamado a realizar procesos de inclusión de las energías renovables como opción para la correlación entre las competencias, conocimientos, el desempeño y cargos de un Ingeniero electrónico con el abanico de posibilidades que ofrecen las energías renovables como opción de desarrollo en el mercado laboral.

El marco de referencia CDIO al presentar una relación del 71% con la primera idea de la sexta ola (residuos= oportunidad), esto revela la universalidad del CDIO como herramienta pedagógica del siglo XXI. Por ende, el programa de Ingeniería Electrónica se perfila como una Ingeniería preparada para los nuevos desafíos del mundo, en particular con el concepto de sexta ola de innovación tecnológica.

La metodología expuesta en este trabajo se puede replicar en distintos programas de Ingeniería para conocer sus fortalezas e identificar oportunidad de inserción en el entorno. En este trabajo, se trató el tema particular de las energías renovables, para futuras investigaciones se pueden tratar temas de interés para los programas académicos.

## REFERENCIAS

- [1] Moody, J. (2010). [La sexta ola de innovación tecnológica](#). Online [Nov 2017].
- [2] Curtin, G. (2004). TNEP Next Wave of Innovation. TNEP International Keynote Speaker Tours.
- [3] Ruyet, D. (2011). [Teorías del colapso energético \(I\): Las olas de Kondratieff](#). Online [May 2018].
- [4] Neto, J. (2011). Sistema regional de innovación en el contexto del desarrollo endógeno en Ceará, Brasil. Universidad Autónoma de Madrid.
- [5] Restrepo, G. (2015). Aplicación del análisis formal de conceptos al estudio de relaciones entre las capacidades bacterianas de bioadsorción de uranio y torio en la biorremediación de desechos radiactivos. En: II semana internacional X semana de ciencia, tecnología e innovación.
- [6] Granollers, T. (2004). MPlu+a. una metodología que integra la ingeniería del software, la interacción persona-ordenador y la accesibilidad en el contexto de equipos de desarrollo multidisciplinares. Universidad de Lleida.
- [7] Aldana, J. (2018). Análisis de la incorporación del programa de ingeniería electrónica de la universidad del quindío en las olas de innovación tecnológica. Universidad Pontificia Bolivariana.
- [8] Universidad del Quindío (2017). [Grupos de Investigación](#). Online [May 2018]
- [9] Sánchez, E. (2010). Hacia una tecnología didáctica. Rev. sobre Aprendiz. e innovación Educ. 2, 2253–2260.
- [10] USDidactic (2003). [Engineering Educational Lab Equipment Energy Conversion](#). Online [May 2018].
- [11] Festo (2015). [LabVolt Series by Festo Didactic - Solar Power Training System \(8010-20\)](#). Online [Mar 2018].
- [12] UPME (2014). Acciones y perspectivas en eficiencia energética. Grupo de Eficiencia Energética.
- [13] Ministerio de Minas y Energía (2010). Sistema de información de eficiencia energética y energías alternativas. Bogotá.
- [14] ANDI (2017). Política nacional para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Comité Nacional de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.
- [15] Universidad del Quindío (2016). Proyecto educativo de programa pep ingeniería electrónica 2016-2025. Armenia.
- [16] Huchard, M. (2013). [Relational Concept Analysis \(RCA\)](#). Ann Math Artif Intell 67, 81–108.
- [17] Kuznetsov, A. (2017). Formal Concept Analysis Research Toolbox (FCART). International Laboratory for Intelligent Systems and Structural Analysis.

# Diseño y construcción de un interruptor con Wifi para control y monitoreo doméstico (Internet de las cosas)

Alben Melo<sup>1</sup>

Wilder Pardo<sup>2</sup>

Katherinne Urrego<sup>3</sup>

Corporación Universitaria del Meta - UNIMETA  
Villavicencio – Colombia

Si se quiere tener control y monitoreo de la iluminación de una casa o edificio, lo primero que se debe hacer es cambiar los interruptores convencionales por interruptores especiales para Domótica. La idea es que solo se deba que hacer eso, cambiar los interruptores, sin necesidad de modificar la instalación eléctrica, la tubería o transformar las paredes. Este proyecto buscaba diseñar un interruptor triple que se adaptara a la normativa eléctrica colombiana, que cumpla con el tamaño y funcionalidad. Para ello se plantea en primera instancia diseñar el prototipo del interruptor triple desde su forma (ancho, alto, largo, color) según las medidas estándar de las cajas y tubería existentes. Hubo que adaptar los circuitos electrónicos al tamaño requerido, para ello se usó un software de diseño en 3D llamado FreeCAD para las tapas, cubiertas y pre-visualizar los espacios y formas que tendría el producto final; también un software de electrónica llamado Proteus para el diseño de los circuitos impresos de la tarjeta microcontroladora, fuente, relés y los componentes usados. El más importante es la tarjeta Wemos D1 Mini que es la encargada de contener el código de programación y la conexión vía Wifi, la otra parte del proyecto consistía en desarrollar la aplicación móvil (app) que es la que controla y monitorea el encendido, apagado y temporizado de las luces, y para ello se utilizó App Inventor 2. Implementar un dispositivo que cumpla con los estándares de calidad necesarios para ser comercializado, tiene un trabajo arduo, se evidencio que, desde el diseño, hay tener en cuenta muchas variables, además de lo electrónico. Fue un reto interesante porque para cumplir con los objetivos hubo que aprender muchos conceptos nuevos y trabajar varios programas. Las pruebas realizadas dejaron buenas respuestas, entre ellas el funcionamiento básico planteado, queda por trabajar la App, poner funciones y opciones de configuración para buscar redes Wifi y establecer las IP.

## 1. INTRODUCCIÓN

En momentos donde la famosa palabra Wifi, toma gran relevancia en el avance tecnológico, y la palabra Domótica se hace más importante, la Ingeniería Electrónica no podría estar alejada de este asunto y más aún el semillero de investigación, donde se plantea explorar nuevos caminos, en este caso tecnológicos. Es así que se planteó un proyecto enfocado al internet de las cosas [1], donde se pueda abarcar toda esta temática. Diseñar desde ceros un interruptor que funcione normalmente y además se conecte vía Wifi a un dispositivo móvil (Smartphone o Tablet). Se involucran temas que los estudiantes de Ingeniería Electrónica aún no han visto o no hacen parte del plan de estudios, por lo que el proceso de aprendizaje autónomo se vuelve más significativo, dando cabida a la creatividad y el desarrollo de nuevos métodos de proyectos útiles, no solo para los mismos estudiantes, sino también para las personas en general quienes terminan aprovechando las innovaciones.

En este proyecto de investigación se buscaba dar una ventaja tecnológica, a partir de situaciones cotidianas, como lo es encender un bombillo de una casa, y así mismo utilizar objetos del diario vivir, los cuales puedan desarrollar este proyecto de manera más ágil, efectiva y de fácil acceso por la sociedad. Los autómatas programables es lo más útil para tener control sobre procesos, este proyecto contempla dispositivos de menor impacto y de más adaptabilidad [2] en tamaño y capacidad.

## 2. MARCO TEÓRICO

Del Internet de las cosas se encuentran muchas explicaciones, pero una muy precisa seria: “La revolución tecnológica que posibilita que Internet alcance el mundo real de los objetos físicos, convirtiendo objetos comunes en *cosas inteligentes* conectadas a Internet” [3]. Por consiguiente, se podría establecer que *Internet of Thing* es el término más exacto que se usa para las aplicaciones de control basadas en internet, y que para este proyecto marcó el horizonte.

### 2.1 Instalaciones eléctricas en Colombia

En Colombia las instalaciones eléctricas domiciliarias están regidas por la RETIE [4], esto nos dice que en todas las casas y edificaciones se maneja un estándar de cajas, ductos, cargas, voltajes, etc. Por lo tanto, el proyecto debe adaptarse a dicha estandarización. De este punto se parte para plantear los primeros diseños, e ir cambiando constantemente hasta obtener el más adecuado para hacer el prototipo, quiere decir que según la NTC 2050 [5] se deben tener en las paredes cajas PVC rectangulares o cuadradas para la instalación de tomacorrientes, rosetas y/o interruptores. Entonces el prototipo al ser terminado debe estar en las condiciones de poderse instalar en cualquier pared que tenga dichas cajas estándar.

---

<sup>1</sup> [alben.melo@unimeta.edu.co](mailto:alben.melo@unimeta.edu.co)

<sup>2</sup> [wilder.andres1221@gmail.com](mailto:wilder.andres1221@gmail.com)

<sup>3</sup> [katherinneurrego@hotmail.com](mailto:katherinneurrego@hotmail.com)

## 2.2 Popularización del Wifi

De un tiempo para acá ya es muy común buscar o preguntar si hay Wifi para conectarse, esto debido a la gran facilidad que tienen hoy las comunicaciones inalámbricas de abarcar a los usuarios, según Evans [6] en estos momentos hay más dispositivos conectados a internet que personas conectadas. Esto deja ver que el “Internet de las Cosas” ya está aquí, por eso el proyecto selecciona Wifi sobre otros medios inalámbricos (Bluetooth, RF, etc.).

## 2.3 Domótica

El hombre siempre busca Controlar y monitorear todos los dispositivos eléctricos del hogar para optimizar recursos [7]. Con esta premisa, desde un Smartphone o un computador, se podría tener acceso vía Wifi desde cualquier parte de la casa a todos los elementos eléctricos, además de tener el control *on/off* también se podría temporizar o cronometrar el funcionamiento de estos dispositivos. Como se usa Wifi, es más sencillo tener conexión a la nube (internet) y poder ejercer el control y monitoreo desde cualquier parte del mundo. La Domótica está trascendiendo a un nivel superior, este es denominado “Hogar Digital” [8] que ya tiene más sistemas integrados además de los conocidos. En la Figura 1 se muestra como se planteó la idea inicial del proyecto, las partes que complementan los interruptores con Wifi y el planteamiento de las fases de desarrollo.

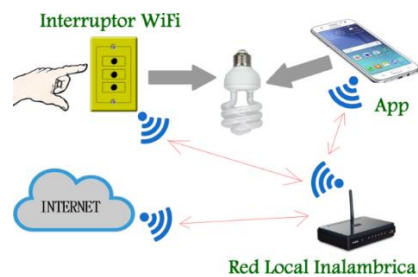


Figura 1. Diagrama funcional de partes

## 2.4 Desarrollo de APP

El uso de los celulares o tabletas ya está generalizado, es común verlas en la vida cotidiana, estos dispositivos no serían tan populares si no tuvieran la facilidad de implementarles aplicaciones de toda índole. Dichas aplicaciones o App son tan abundantes debido a las múltiples formas de desarrollar estos programas, se tiene el *App Inventor 2* como una de ellas, este permite crear App para sistemas operativos Android el cual utilizan las mayorías de equipos móviles y además es de gran utilidad para la integración con tarjetas programables como Arduino [9].

## 3. MÉTODO

Tipo de investigación es Proyectual [10] pues el producto final es un prototipo basado en conocimientos ya disponibles. El enfoque de investigación es cuantitativo pues la experimentación fue lo que predominó el desarrollo del proyecto, aplicando los resultados a la solución de un problema real. Este proyecto se trabajó por fases, en las cuales se programaron actividades individuales y grupales, y cuyos avances eran requisito para la siguiente, esto con el fin de procurar que todos adquirieran los mismos conocimientos del proyecto así sus ocupaciones varias pudieran influir en la participación del proyecto. Algunas fases podían estar ligadas a otra siguiente, quiere decir que no se podía avanzar hasta que dicha fase no fuera terminada a cabalidad. Mientras que otras no tenían esta discriminación, entonces se podían abordar en forma paralela.

### 3.1 Fases de desarrollo

Para dar inicio al proyecto, se hizo una planeación que dispondría de varios procesos y que supondrían unos períodos. Dichos procesos se establecieron en equipo y de acuerdo a las habilidades individuales, esto complementaria a los de menos desempeño en algunas tareas.

#### ▪ Fase 1

1. Socialización del proyecto: se reunió el equipo de trabajo y se mostró lo que se quería realizar. Fue importante establecer que la consulta documental y el estado del arte darían bases sólidas para empezar el proceso de investigación.
2. Revisión de otros productos similares: Existen dispositivos de este tipo, incluso más sofisticados, ninguno de fabricación nacional, en el mercado local oscilan entre los \$120,000 hasta los \$450,000 y algunos deben adquirir otros complementos por separado.
3. Sugerencias y aportes: Se tomaron en cuenta tanto en el diseño como en la planeación.
4. Revisión de lista de materiales: se propusieron elementos conocidos y algunos de los cuales no se habían usado antes. La *Wemos mini D1* fue la tarjeta microcontrolada escogida por su tamaño y capacidad, esta última característica cumplió en comunicación Wifi y compatibilidad en la programación con el IDE Arduino.
5. Capacitación de Software: CAD y Diseño de circuitos impresos, se trabajó FreeCAD para diseñar en 3D y Proteus para hacer el PCB.



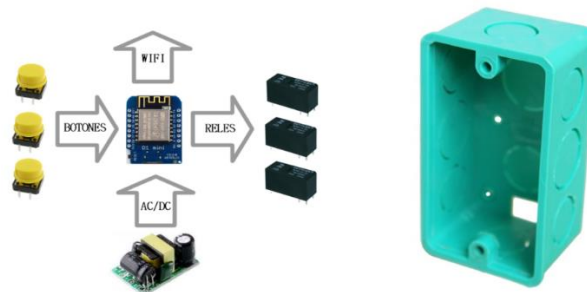
6. Borradores y bosquejos de los primeros diseños: los diseños internos fueron los de más trabajo por el espacio limitado mientras que externamente fue más cómodo, color, forma, material.

▪ **Fase 2**

1. Revisión de la documentación técnica a usar en el proyecto.
2. Asignación de funciones a estudiantes: aquí se distribuyeron algunas tareas, entre ellas las de hacer consultas y lecturas.
3. Familiarización con componentes electrónicos: hacer las primeras pruebas con los componentes.
4. Capacitación en Wifi: adicional a las asignaturas de Comunicaciones o de transmisión de datos, y sin importar si ya habían cursado estas asignaturas, se llevó a cabo unas charlas dedicadas a las comunicaciones inalámbricas y en específico a al protocolo IEEE 802.11.

▪ **Fase 3**

1. Montaje en protoboard y pruebas básicas.
2. Socialización de código de programación.
3. Fabricación de circuitos impresos: el diseño debía servir para poder montar cualquiera de los tipos de interruptor, sencillo, doble o triple. La Figura 2 muestra los componentes más importantes que deberían integrarse en el espacio establecido por la caja plástica de PVC.

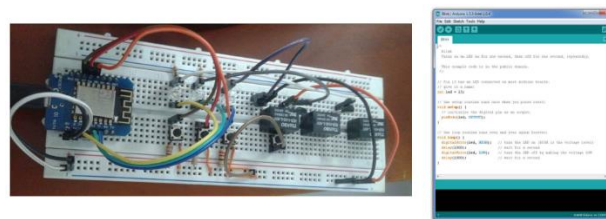


**Figura 2.** a) Componentes destacados. b) Caja Rectangular PVC 5800

4. Pruebas locales de transmisión de datos: en esta parte se logró establecer comunicación bidireccional entre el PC y la Tarjeta Wemos usando el monitor serial y esto a través de un router de prueba. Así se trabajó en red de área local, para acceder a la nube, la Internet, se debía trabajar en la configuración del router y el acceso al servicio de internet.

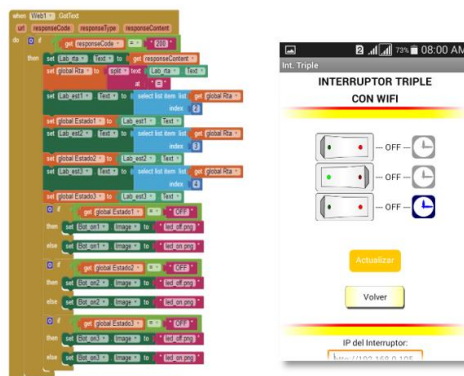
▪ **Fase 4**

1. Pruebas en condiciones reales: a través del montaje en protoboard se probaron los códigos de la tarjeta Wemos para conectarse al router, como se ve en la Figura 3, el montaje y el IDE de Arduino.



**Figura 3.** a) Pruebas en protoboard. b) Programación Tarjeta Wemos

2. Programación de la App (App Inventor 2): la Figura 4 muestra la forma de programar la aplicación y como va quedando la interfaz del usuario.

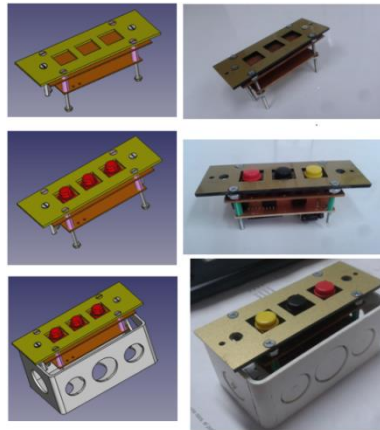


**Figura 4.** a) programación por bloques. b) Interfaz

▪ *Fase 5*

1. Montaje final en el tablero de pruebas: se implementó un tablero con caja de tacos, tubos, cajas rectangulares, octogonales, tomacorriente e interruptores convencionales, para adaptar el prototipo.
2. Pruebas: Se realizaron varios ensayos tanto activando el interruptor manualmente y vía App en conexión Wifi Local. Para las pruebas vía App, pero desde internet si hubo complicaciones pues se requería configurar el router. Hubo que trabajar varias conexiones Wifi, redes diferentes con internet y sin internet.

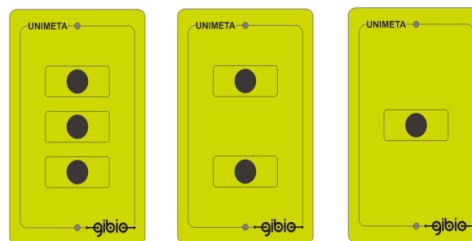
En la Figura 5 se compara la etapa de diseño y la etapa de ejecución, usando FreeCAD se hizo la simulación en 3D, se construyeron todas las partes con sus medidas reales, desde la caja plástica hasta los componentes electrónicos. Este software permite acomodar todos los elementos y así poder analizar el espacio ocupado y disponible [11]. Uno de los objetivos era poder adaptar todo a un espacio específico.



**Figura 5.** Diseños 3D vs Implementación Real

#### 4. RESULTADOS

El proyecto aún está en desarrollo, sin embargo, los avances son significativos, ya se puede decir que se ha avanzado en un 95%. Ya se tienen los diseños de los frontales de los tres tipos de interruptores como se ve en la Figura 6. Los mismos circuitos impresos sirven para los tres tipos de interruptores.



**Figura 6.** Interruptores Triple, Doble y Sencillo con Wifi

Lo más llamativo fueron las aplicaciones que se aprendieron a trabajar, para poder desarrollar este proyecto, según las fases, había que capacitarse en el manejo de software especializado. Estas capacitaciones en su mayoría fueron autónomas, de manera independiente se hizo un auto-aprendizaje y retroalimentación grupal para que los integrantes estuvieran a un mismo nivel de conocimiento.

Durante la consulta de dispositivos electrónicos, se evidencio que actualmente hay disponible en el mercado gran variedad de estos, lo que permite poder tener la opción de seleccionar el más adecuado para el proyecto. Para el caso de la tarjeta microcontrolada que incluía Wifi, además de seleccionarla por su tamaño y capacidad técnica, se debió trabajar desde cero, pues era nueva para todos los integrantes del semillero, auto-aprendizaje fue la palabra más acorde para solucionar esta situación.

Se lograron diseños elaborados tanto del interruptor como de los circuitos impresos, se hicieron las tapas en acrílico y se consiguió la tornillería específica. Las simulaciones electrónicas y el modelamiento en 3D del montaje fue un éxito. Se logró tener todos los componentes electrónicos, que ya se probaron por separado.

El trabajo por etapas permitió enfocar la atención en temáticas puntuales que definieron el curso del proyecto, por ejemplo, conseguir la tarjeta electrónica microcontrolada con Wifi o la fuente AC/DC miniatura era indispensable para empezar a diseñar en 3D; estos dispositivos que de una u otra manera existen y se han trabajado sin importar el tamaño, pues casi siempre se usan sobre protoboard. Hacer la búsqueda y poder comprarlos fue un ejercicio que realimento la visión acerca de la comercialización de muchos elementos electrónicos en Colombia. Sin duda al obtener un producto nuevo hay que documentarse bien para aprenderlo a manejar y empezar a hacer las pruebas respectivas. La Figura 7 muestra el interruptor triple instalado en una caja plástica PVC en una instalación eléctrica estándar.



**Figura 7.** Interruptor triple funcionando

Para crear la app desde cero, además de aprender a programar había que documentarse sobre comunicación y protocolos en Wifi; y elementalmente hacer muchas pruebas. Al planificar el funcionamiento de este software se tuvieron en cuenta muchas variables y condiciones, lo que da como resultado un sistema bastante extenso y para llevarlo a una finalización casi completa llevaría mucho más tiempo del previsto. Por esta razón la App que se ha logrado desarrollar tiene los elementos básicos de funcionamiento, pero queda planteado seguir trabajando para la mejora de la aplicación. Todos los integrantes de este semillero son estudiantes de ingeniería electrónica, se tiene previsto interrelacionar un semillero de ingeniería de sistemas para obtener un apoyo notable en el desarrollo de software. El App Inventor II es una plataforma que permite desarrollar aplicaciones móviles mediante una programación gráfica de bloques.

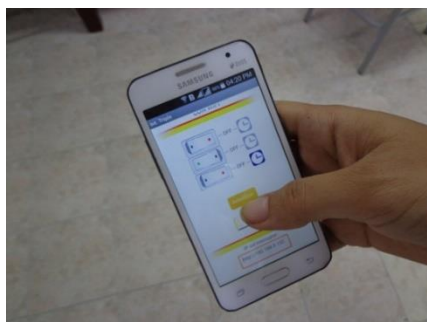
Este proyecto hizo que los integrantes pudieran entender todo el trabajo que conlleva sacar un producto con las especificaciones de alta calidad, aunque al hacer las pruebas en protoboard, se evidencio el funcionamiento, pero también se vio la sencillez del circuito; fue cuando se llevó a la imaginación, que eso mismo que veían en el banco del laboratorio tenía que quedar dentro de un espacio menor al de una caja rectangular PVC, menor porque ahí también hay conexiones eléctricas, cableado grueso que también ocupa espacio en dicha caja. Con eso se empezó la búsqueda de herramientas y ayudas informáticas para realizar este diseño.

## 5. CONCLUSIONES

Después de ver terminado el proyecto casi en su totalidad, se puede extraer algo muy significativo, hay una gran diferencia entre crear un prototipo que funcione en una caja y un prototipo que cumpla unas características de presentación y funcionalidad. Durante el proceso académico universitario se desarrollan muchos proyectos de aula, semestrales, finales y ejercicios que logran utilizar y aplicar lo aprendido en el aula y laboratorio, pero comparando con lo hecho en el semillero, no se había trabajado en tanto detalle, tanto a nivel funcional como a nivel de la presentación final. Buscando un terminado que cumpliera con unas expectativas visuales y espaciales muy específicas. Se trabajó más allá de lo acostumbrado en un prototipo. Se buscó minimizar espacio entre componentes y a su vez buscar componentes lo más pequeños posibles.

1. Comercialmente en Colombia se consiguen buenos materiales electrónicos para desarrollo de proyectos de ingeniería.
2. El manejo de la comunicación Wifi es más común de lo que se cree.
3. Además del software especializado para electrónica, se conocieron y trabajaron otros programas de diseño estructural en 3D.
4. Elaborar un prototipo de excelente presentación para los usuarios requiere un gran trabajo de diseño previo.

La Figura 6 muestra la aplicación móvil en funcionamiento en un Smartphone, que requiere sistema operativo Android, conexión Wifi o tener Datos para poder acceder a la internet.



**Figura 6.** Pantallazo de la App en funcionamiento

Este proyecto se continuará trabajando en el semillero hasta lograr un producto de la más alta calidad. Ya se plantearon nuevos diseños con dispositivos electrónicos de superficie y circuitos impresos más tecnificados. También se busca cambiar la etapa de potencia, cambiar relés por triacs, en la medida que se puedan ajustar en tamaño y capacidad.

Cuando se trabajó en la búsqueda de materiales, quedo una base de datos de almacenes y empresas de electrónica que servirán para lograr la optimización del proyecto.

Algo muy especial fueron las capacitaciones, estas consistieron en participar en conjunto de la inducción o enseñanza de alguna temática en particular y que no hace parte del plan de estudios o que en su defecto no la han cursado. El semillero pretendía mejorar las habilidades de sus estudiantes haciendo capacitaciones.

## REFERENCIAS

- [1] Rose, K., Eldridge, S. & Chapin, L. (2015). La Internet de las cosas - Una breve reseña. Internet Society
- [2] Barbado, S., Sierra, J. & Bravo, J. (2013). Automatismos Industriales. Alfaomega.
- [3] Fermín, F. & Guerra, J. (2017). Internet de las Cosas. *Perspectiv@s* 10(11), 45-49.
- [4] Minenergía (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. Ministerio de Minas y Energía. Colombia.
- [5] ICONTEC (1998). Código eléctrico colombiano, NTC 2050. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Colombia.
- [6] Evans, D. (2011). Internet de las cosas, Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo. Cisco Internet Business Solutions Group.
- [7] Dominguez, H. & Sáenz, F. (2006). Domótica: Un enfoque socio-técnico. Centro de Domotica Integral. España.
- [8] Junestrand, S., Passaret, X. & Vásquez, D. (2005). Domótica y Hogar Digital. Paraninfo S.A.
- [9] Medina, F. (2013). Arduino y Android una Pareja para Aplicaciones de Ubicuidad. En: 11th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Cancun, Mexico.
- [10] Munari, B. (2008). Cómo nacen los objetos. Gustavo Gili S.A.
- [11] Van Havre, Y. (2010). [FreeCAD - A Manual](#). Community forum. Online [Dec 2017].

# Diseño y construcción de un prototipo de prótesis mioeléctrica de antebrazo y mano con dos grados de libertad

Javier R. Patiño R.<sup>1</sup>

Yordin C. Acevedo C.<sup>2</sup>

Daniel H. Albarracín S.<sup>3</sup>

Fundación Universitaria de San Gil – UNISANGIL  
Yopal – Colombia

El siguiente artículo sintetiza el desarrollo de un prototipo de prótesis mioeléctrica de antebrazo y mano con dos grados de libertad, implementada por medio de impresión 3D, servomotores, sensores y placas de desarrollo electrónico, para garantizar flexibilizar en el diseño y una producción a bajo costo. Se definiendo como primera articulación la extensión y flexión de los dedos de la mano y como segunda la pronación y supinación en la muñeca, la cual es la rotación hacia al lado izquierdo y al derecho respectivamente. Se emplean señales Electromiográficas (EMG) producidas por los músculos cuando se contraen o se flexionan, generando pequeñas señales eléctricas en un rango de 50  $\mu$ V a 20-30mV a una frecuencia de 7-20 Hz, la captación de estas señales se obtienen por medio del dispositivo Myo Gesture Control Armband dispuesto con ocho (8) sensores EMG (electrodos de superficie) de grado médico, la cual amplifica y elimina el ruido presente en el entorno, enviando los datos obtenidos de los sensores por Bluetooth a la plataforma de desarrollo electrónico, la cual procesa e interpreta los datos recibidos para controlar los servomotores presentes en la prótesis.

## 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que no existen cifras concretas acerca de la cantidad de personas que sufren amputaciones en Colombia, la Asociación Colombiana de Medicina Física y Rehabilitación informó que de 200 a 300 personas por cada 100 mil habitantes ha sufrido de amputaciones por pérdida o ausencia total o parcial de una extremidad [1], ya sea por enfermedades como: la diabetes, problemas circulatorios, infecciones, trastornos de coagulación e hipertensión arterial, o accidentes de toda índole. Las personas que sufren la pérdida de alguna extremidad tienen limitaciones en la realización de actividades que requieran motricidad, fuerza y equilibrio. En el caso de pérdida de miembros superiores se ven aún más impedidas, debido a que la disposición anatómica de la mano es la que permite realizar acciones complejas, se hace uso constante de ellas y se atribuye la evolución del hombre a la disposición de los pulgares.

Desde miles de años atrás se ha empleado las prótesis para mitigar estas limitaciones [2], se utilizaban desde artefactos basados en un solo trozo de madera para reemplazar una pierna, hasta mecanismos más sofisticados para sustituir brazos. Hoy en día las prótesis que se encuentran son en materiales plásticos y algunos metales empleados en la industria aeroespacial, estas son combinadas con recubrimientos sintéticos para mejorar su apariencia, algunas también son accionadas por complejos mecanismos o circuitos electrónicos. Se puede clasificar el tipo de prótesis según sus características de construcción y el tipo de control que permite en: cosméticas, mecánicas y electromecánicas.

Para esta investigación, de tipo formativo, se realizará el diseño e implementación de una prótesis electromecánica, construida mediante impresoras 3D, con servomotores como actuadores y controlada por medio de las señales mioeléctricas de los músculos del antebrazo. A estos tipos de mecanismos de rehabilitación se les denomina prótesis mioeléctricas. El principal interés en la creación del prototipo es replicar los movimientos básicos de la mano, empleando para esto dos grados de libertad, la supinación y pronación, que es la rotación de la mano hacia el lado derecho e izquierdo respectivamente, y la flexión y extensión que es el recogimiento de la mano en forma de puño y el estiramiento o prolongación de la mano, lo cual permita que la prótesis sirva como apoyo para realizar algunas actividades de la vida diaria.

Con el desarrollo de una prótesis mioeléctrica de miembro superior, para personas que hayan sufrido amputaciones de antebrazo y mano, se espera mejorar la calidad de vida, permitiéndoles ser más independientes y realizar algunos movimientos básicos con esta prótesis. Además, influiría en el estado anímico y ayudaría a la rehabilitación de la persona.

Para la ejecución de este desarrollo se implementó una metodología secuencial de cinco fases así: una fase análisis en la cual se identifican las variables, las tecnologías a emplear y los requerimientos a cumplir, en una segunda fase, fase de diseño, se plantea la estructura y los componentes electrónicos que cumplan con los requerimientos encontrados, en una tercera fase, la implementación, se construye el prototipo dotándolo de los componentes electrónicos, y mecánicos diseñados, seguido a esto se realiza la fase para confirmar el funcionamiento y verificación, enfocada en evaluar el dispositivo como una herramienta de rehabilitación a continuación se exponen estas cuatro fases.

---

<sup>1</sup> javierpatino4@unisangil.edu.co

<sup>2</sup> camiloacevedohsc@gmail.com

<sup>3</sup> dalbarracin@unisangil.edu.co

## 2. MÉTODO

Para el proyecto se toman en cuenta las variables de la Tabla 38, las cuales guiarán y delimitarán su desarrollo.

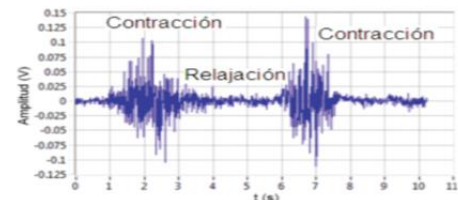
**Tabla 38.** Variables e indicadores

Variables	Dimensiones	Indicadores
Tipo de amputación	Determina el tipo de prótesis a implementar	Amputaciones transradiales, Amputación que se realizara por medio del hueso del radio (en medio del antebrazo)
Dimensiones	Determina las dimensiones de la prótesis	Personas mayores de dieciocho (18) años, finalización de crecimiento corporal
Grados de libertad	Determina las articulaciones que se requiere controlar	Dos grados de libertad [3]
Costo de fabricación	Determina la inversión en replicar un prototipo	Bajo costo de fabricación, se emplea impresión 3D y plataformas de desarrollo

La Tabla 1 permite delimitar algunas particularidades del prototipo, al seleccionar la amputación transradial la prótesis debe incluir parte del brazo y la mano completa, incluyendo la muñeca. Otros tipos de amputaciones más profundas como la desarticulación del codo o la amputación transhumeral, en las que se pierde la totalidad de los músculos del antebrazo, presentan un mayor reto debido a que los músculos directamente implicados en los movimientos de la muñeca no están presentes [4].

Los prototipos de prótesis pueden ajustarse a la antropometría de cada paciente, los diseños mecánicos de estos, se realizan con herramientas de software especializado que permiten modificar fácilmente sus dimensiones. Para este prototipo se emplean las medidas promedio del brazo y mano de un adulto, debido a que las variaciones en proporciones y medidas de las extremidades de niños y los jóvenes varían de acuerdo a su crecimiento óseo natural. Se determinan dos grados de libertad para el prototipo, la prono-supinación de la mano y flexo-extensión de los dedos de la mano en conjunto. Para realizar el control de más articulaciones se requiere el análisis electromiográfico de más músculos, pero el nivel de amputación que se determinó limita esta cantidad. Además, a nivel clínico, los estudios estándar proponen controlar una o dos articulaciones, sin importar el tipo de prótesis [5].

Otras decisiones en el diseño dependerán del tipo de control que se desea implementar, para el proyecto se decide realizar un control mioeléctrico, basado en las señales electromiográficas EMG, la captación de las señales eléctricas producidas por los músculos durante una contracción muscular se conoce como electromiografía. Estas señales son generadas por el intercambio de iones a través de las membranas de las fibras musculares debido a una contracción muscular. La electromiografía consiste básicamente en la adquisición, registro y análisis de la actividad eléctrica generada en nervios y músculos a través de la utilización de electrodos (superficiales, de aguja, implantados). Las mediciones extraídas de EMG proporcionan una información valiosa acerca de la fisiología y los patrones de activación muscular (Figura 1).



**Figura 1.** Señal EMG relajación y contracción de un musculo

Dicha información refleja las fuerzas que son generadas por los músculos y la temporización de los comandos motores. Además, puede usarse en el diagnóstico de patologías que afectan al Sistema Nervioso Periférico, las alteraciones funcionales de las raíces nerviosas, de los plexos y los troncos nerviosos periféricos, así como de patologías del músculo y de la unión neuromuscular. La amplitud de las señales EMG varía desde los microvoltios ( $\mu\text{V}$ ) hasta un bajo rango de milivoltios (mV) [6].

Las características de las señales de control, antes mencionadas, conducen a la selección del dispositivo de adquisición de señales EMG, para el proyecto, teniendo en cuenta el rango de las señales y el tipo de prótesis se selecciona el brazalete *Myo gesture Control Armband*, este permite la adquisición de señales mioeléctricas tanto en los músculos del brazo como los del antebrazo gracias a su forma de brazalete (Figura 2).



**Figura 2.** Dispositivo Myo Gesture Control Armband

*Myo gesture Control Armband*: este brazalete es un dispositivo de reconocimiento de gestos que se coloca en el antebrazo y fabricado por los laboratorios Thalmic. Este permite al usuario controlar la tecnología inalámbrica (por medio de comunicación Bluetooth BLE) a través de diversos movimientos de la mano. Se utiliza un conjunto de sensores de electromiografía (EMG) que detectan la actividad eléctrica en los músculos del antebrazo, en combinación con un giroscopio, acelerómetro y magnetómetro para reconocer gestos. Es un dispositivo ligero y discreto (pesa menos que un reloj de pulsera promedio) e incluye una batería de iones de litio incorporada recargable que ofrece un uso continuo entre 48 horas y durar hasta 120 horas dependiendo de la aplicación que se esté ejecutando [7].

### 3. DISEÑO

Los siguientes diseños proporcionaron las bases para la implementación del prototipo, se muestran en el siguiente orden: sistema de adquisición de señales eléctricas musculares, circuitos eléctricos, programación en plataforma de desarrollo electrónico, modelo para impresión del prototipo en 3D y mecanismos electrónicos para el control de la prótesis.

#### 3.1 Sistema de adquisición de señales eléctricas de los músculos del brazo

El brazalete Myo Gesture Control Armband elaborado por la empresa Thalmic Labs, está compuesto por 8 sensores de electromiografía; para receptar las señales musculares, se ubica el brazalete en el antebrazo que está compuesto por 20 músculos diferentes, usando los gestos definidos por Myo y mediante la comunicación por bluetooth a la placa de desarrollo se controlan los mecanismos electrónicos de la prótesis.

Como un primer ejercicio se realizó la comunicación del brazalete Myo gesture control armband a un computador por medio del módulo bluetooth USB 4.0 BLE que permite conectar la Myo gesture control armband al computador y controlar por medio de gestos algunas aplicaciones de software y trabajar con las unidades periféricas del computador. Luego, utilizando la aplicación API's de Myoduino, se selecciona el puerto serial al cual está conectada la plataforma de desarrollo y realizar la comunicación por medio del software Armband Manager y se controlan los mecanismos electrónicos del prototipo (Figura 3).

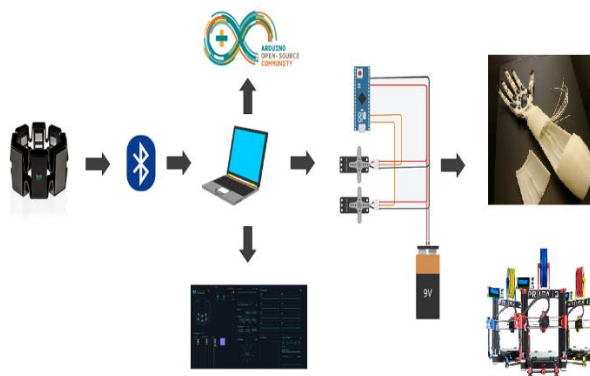


Figura 3. Arquitectura de conexión de Myo por PC

En un segundo ejercicio de comunicación se implementó un módulo bluetooth HM-10 acoplado al puerto serial de la plataforma de desarrollo y conectado a su vez con el brazalete Myo Gesture Control Armband por medio del módulo Bluetooth. Esta comunicación puede ser realizada mediante el desarrollo de un firmware personalizado para los módulos bluetooth BLE que cuenten con el micro CC2540/ CC2541, en este caso se usa los módulos HM-10/HM-11 con el micro CC2541 de Texas instruments (Figura 4). Este proceso omite el uso de computadora al realizar la conexión directa de los sensores con la placa de desarrollo, eliminando los retardos producidos.

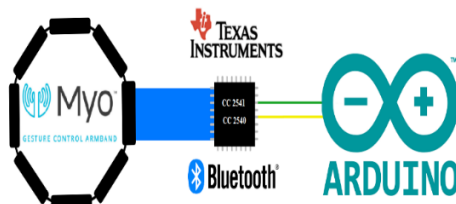


Figura 4. Arquitectura de conexión de Myo por bluetooth HM-10

#### 3.2 Diseño de la prótesis impresión 3D

La impresión 3D es un proceso que permite hacer objetos tridimensionales solidos a través de un modelo digital, pueden realizarse desde software gratuitos como SketchUp, entre otros. El diseño de un modelo 3D requiere de una conversión desde un formato STL, estándar para impresión 3D, a un lenguaje G-code comprensible por la impresora 3D. Slic3r es la herramienta para convertir un modelo digital 3D en instrucciones para la impresora 3D (Generador G-code). Slic3r corta el modelo en rebanadas horizontales (capas), genera las trayectorias para rellenarlas y calcula la cantidad de material a extruir.



### 3.3 Diseño de Circuitería (PCB)

El diseño de circuitería (PCB) se desarrolló en el software Proteus teniendo en cuenta la ubicación de los elementos electrónicos y la alimentación en general del circuito para la plataforma de desarrollo y los mecanismos electrónicos, utilizando servomotores en el control de los grados de libertad del prototipo de prótesis mioeléctrica.

## 4. IMPLEMENTACIÓN

Se realiza el proceso de impresión 3D de las partes del prototipo de prótesis mioeléctrica de antebrazo y mano en la impresora 3D Prusa i3 y la implementación del circuito para el control de los mecanismos electrónicos. El diseño de un modelo 3D requiere de una conversión desde un formato STL a un lenguaje G-code comprensible por la impresora 3D para realizar el proceso de impresión; como el software de Slic3r que permite rebanar el diseño 3D en un número de capas definiendo el modelo si se desea imprimir en una baja o alta calidad de impresión, y Pronterface para el proceso de impresión y control de la impresora 3D. Slic3r se incluye con los paquetes de software de host más importantes: MatterControl, Pronterface, Repetier-Host, ReplicatorG y ha sido apoyado y financiado por casi todas las principales empresas de impresión en 3D en el mundo [8].

El prototipo de prótesis mioeléctrica es un modelo de Inmoov (Figura 5), realizado por el diseñador francés Gael Langevin [9]. Este diseño cumple con los dos grados de libertad propuestos, que son la pronación y supinación de la rotación de la muñeca hacia el lado izquierdo y derecho, flexión y extensión de los dedos. Utilizando material de impresión como PLA Y ABS.

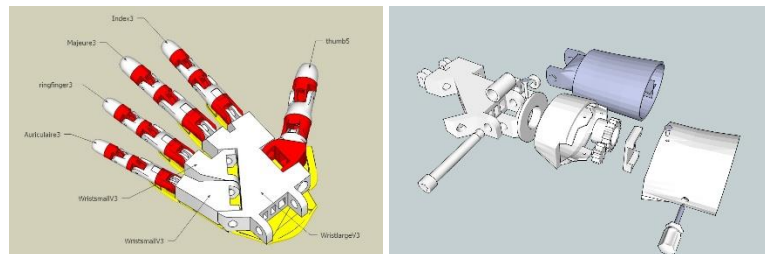


Figura 5. Prótesis prostética de antebrazo y mano Inmoov [10]

Se realizó la impresión de la totalidad de las partes de la prótesis, el material utilizado en impresión fue PLA color negro Y ABS color azul (Figura 6).



Figura 6. Prótesis impresa y ensamblada

Para el ajuste de articulación de los dedos se limo cada sección eliminando el rozamiento y lograr un terminado más liso en busca de un mejor movimiento, además se usaron puntillas  $\frac{3}{4}$  para unión de cada sección de los dedos, dos tornillos hexagonales de  $\frac{1}{4} \times 2''$  y uno  $\frac{1}{4} \times 3''$  para la unión con la palma de la mano. En la (extensión y flexión) de los dedos se utilizó hilo de pescar e hilo de caucho adicionalmente se hizo la instalación de los servomotores en donde iban sujetos estos hilos brindando así el primer grado de libertad, además se utilizó otro servomotor en la articulación de la muñeca para la (pronación y supinación) cumpliendo con los dos grados de libertad propuestos.

Se ensamblo la circuitería a la caja de la prótesis que conforma el antebrazo, se realizó la conexión de los servomotores a los mecanismos que permiten el movimiento de los dedos y la muñeca (Figura 7).



Figura 7. Encaje de circuitería en la prótesis impresa

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El modelo escogido para el prototipo de prótesis cumple con los propósitos para el control de los dos grados de libertad, una vez establecido los requisitos para trabajar con personas que tienen discapacidad, se ajusta el modelo de la prótesis al muñón de la persona por medio del modelado en 3D o ayuda de un escáner. Revisión de conexiones en las tarjetas de control PCB en busca de posibles fallas y continuidad general en todo el circuito como conexión por bluetooth entre el brazalete Myo y modulo HM-10, adquisición y almacenamiento de datos EMG, control de servomotores, compilación y carga de los programas en la plataforma de desarrollo Arduino [11].

Desarrollo de una placa PCB para la obtención de los datos EMG unificados de los 8 sensores de la Myo, y almacenamiento de la información en micro SD respecto a los movimientos a realizar, para implementación de nuevos gestos e interpretación de los datos mediante tablas por Excel. Las amputaciones de miembros superiores después de la articulación del codo, resultan una pérdida muy importante a la persona y limita su trabajo por la ausencia de su extremidad, dificultando realizar actividades diarias, ya que reemplazar una mano es muy difícil debido a su compleja anatomía [12]; por eso el desarrollo de prótesis mioeléctricas ha venido evolucionando desde años anteriores pero a costos muy elevados, pero con ayuda de la implementación por medio de impresión 3D este concepto puede cambiar y ser más accesible.

En el diseño de prótesis mioeléctricas se busca implementar la mayor cantidad de articulaciones posibles para asemejarla a las actividades de un brazo, aplicando métodos eficientes con mecanismos más pequeños que permitan controlar estos grados de libertad, como la independización de cada uno de los dedos, giro y flexión de la muñeca, articulación del codo y aplicación de fuerza de los mismos.

La obtención de las señales musculares, se espera hacer uso de otro tipo de sensores EMG a bajo costo [13], para obtener un control más preciso de los mecanismos a utilizar e igualmente establecer la ubicación de los sensores en los músculos, teniendo en cuenta el acompañamiento de un profesional en medicina o fisioterapeuta para que valore si los músculos del paciente pueden servir para la captación de señales EMG, si presenta atrofia muscular o enfermedades neuromusculares en el área afectada.

El tiempo de funcionalidad de la prótesis mioeléctrica va respecto a las características de las baterías que se están utilizando, lo ideal sería implementar un sistema de alimentación de energías alternativas, como la luz solar por medio de paneles solares que ayude a auto sustentar la funcionalidad de la prótesis.

## 6. CONCLUSIONES

La investigación acerca de la obtención de señales mioeléctricas EMG es un gran avance para la ciencia y la tecnología ya que han sido empleadas para la automatización de prótesis mioeléctricas, evolucionando con las décadas cada vez con mecanismos sofisticados y más complejos para suplir la mayor cantidad de actividades [14].

Las prótesis mioeléctricas que se encuentran comercialmente son de precios muy elevados que solo pocas personas puedan acceder, el desarrollo de prótesis por medio de impresión 3D son una alternativa a bajo costo que permiten diseñar, recrear e implementar mecanismos electrónicos teniendo un control de las prótesis obtenidas en los músculos.

El desarrollo de los mecanismos del prototipo puede ser cambiante permitiendo recrear sus diseños para mejorar los movimientos de las articulaciones, implementando un mejor control entre usuario y la prótesis.

El brazalete Myo Gesture Control Armband es un dispositivo inalámbrico enfocado a controlar tecnología por medio de gestos aprovechando sensores EMG de acero inoxidable de grado médico e IMU (Unidad de medición Inercial) que la conforman sensores de giroscopio, acelerómetro y magnetómetro de tres ejes, este dispositivo viene configurado para reconocer cinco gestos predeterminados, por otro lado Myo no tiene la capacidad de leer, guardar señales y luego reconocer las señales de nuevo si estas se repiten, cabe destacar que generar nuevos gestos e implementarlos en la Myo se requiere de un conjunto de datos enormes obtenidas de las señales EMG asociándolas en cada situación posible con respecto a las variaciones del brazo.

La implementación de nuevos gestos se puede desarrollar por medio de los scripts C++ del SDK para generar programas que puedan trabajar con la Myo o programando por medio de una plataforma de desarrollo y declarando los sensores por independiente teniendo en cuenta la ubicación de cada sensor del brazalete, además la implementación de los gestos deben ser únicos ya que la programación reconoce algunos patrones específicos del gesto, para que al implementar otro gesto en la misma posición no haya conflictos en reconocimiento del gesto anterior.

En el armado del prototipo de prótesis se debe realizar pequeños ajustes con ayuda de un motortool o lima para que las piezas encajen de manera correcta ya que el método de impresión 3D tiene un margen de error dependiendo de la calibración de la impresora, se puede corregir ajustando el tamaño del modelo digital.

## REFERENCIAS

- [1] Smith, d. (2007). Prótesis de Extremidad Superior. Segunda parte. InMotion 17(4), 1-7.
- [2] Norton, K. (2007). A brief history of prosthetics. InMotion 17(7), 11-3.
- [3] Rodríguez, C., Botero, J. & Quintero, H. (2007). Aplicación de la teoría de robots manipuladores a la biomecánica del brazo humano. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 4(4), 51-57.
- [4] Domínguez, L. (2016). Niveles de amputación. En Vázquez, E. (Ed.), Los amputados y su rehabilitación – Un reto para el estado (pp. 77-84). Conacyt.
- [5] Schultz, A. & Kuiken, T. (2011). Neural interfaces for control of upper limb prostheses: the state of the art and future possibilities. PM&R 3(1), 55-67.
- [6] Martínez, C. et al. (2011). Sistema de Adquisición de Datos para Evaluar la Mejora de Pacientes con Discapacidad Motriz. Asociación mexicana de mecatrónica 10, 10-15.
- [7] [Myo Gesture Control Armband](#). Online [Jun 2017].
- [8] [Slic3r](#). Online [Jun 2017].
- [9] [InMoov](#). Online [Jun 2017].
- [10] [Hand and Forarm assembly 3D views](#). Online [Jun 2017].
- [11] Gelardi, G. (2017). [HM-11 hack using CCLoader & Myo Connection Test](#). Online [Jun 2017].
- [12] Catalan, M. (2016). Presente y futuro de la tecnología para rehabilitación de los amputados. En Vázquez, E. (Ed.), Los amputados y su rehabilitación – Un reto para el estado (pp. 119-131). Conacyt.
- [13] Khandpur, R. (2005). Biomedical instrumentation: Technology and applications: Mcgraw-Hill.
- [14] Childress, D. (1985). Historical aspects of powered limb prostheses. Clin Prosthet Orthot 9(1), 2-13.

# Caracterización de los músculos que permitan la mejor adquisición de señales mioeléctricas producidas por los movimientos del hombro

Daniel Albarracín S.<sup>1</sup>

Emilsen Y. Arias C.<sup>2</sup>

Zaira López S.<sup>3</sup>

Fundación Universitaria de San Gil – UNISANGIL  
Yopal – Colombia

La presente investigación es parte de un proyecto macro que el semillero Bioelectronic de la Fundación Universitaria de San Gil lleva a cabo con la Fundación Hands & Heart. Esta investigación se basó en el estudio de señales eléctricas generadas a partir de las contracciones de las fibras musculares que intervienen en los movimientos de la articulación del hombro a través de la electromiografía (EMG), con el fin de caracterizar las fuentes de señal que permiten la mejor adquisición de señal mioeléctrica para un control protésico. Esta investigación se realiza en tres etapas, se inicia desde la compilación y análisis de la información bibliográfica, en la que se determina los músculos y los movimientos más importantes para el estudio; luego se realiza en el laboratorio la etapa de adquisición de las señales mioeléctricas, se seleccionan los dispositivos de adquisición y se determinan cuáles de estos músculos proporcionan las señales eléctricas más distintivas para los diferentes movimientos seleccionados; por último, en la etapa de análisis de resultados, se determinan la combinación de señales que identifican mejor los movimientos seleccionados, esto con el propósito de un futuro control mioeléctrico de una prótesis de brazo completo.

## 1. INTRODUCCIÓN

Aun cuando la medicina en conjunto con la ingeniería ha logrado avanzar en el desarrollo de diferentes dispositivos de rehabilitación, estos resultan muy costosos para los pacientes, teniendo en cuenta que, en su mayoría, estos no son subsidiados por las EPS (Entidades Prestadoras de Salud). Además, las prótesis más empleadas y de menor costo, están muy lejos de ser mecanismos de rehabilitación. Debido a esto el semillero de investigación Bioelectronic de la Fundación Universitaria de San Gil, UNISANGIL, plantea el desarrollo de un dispositivo de rehabilitación, una prótesis completa de brazo a bajo costo, con varios grados de libertad y controlada por señales mioeléctricas, estas señales son variaciones de voltaje producidas por los músculos al contraerse y relajarse. Este proyecto se divide en tres etapas, la primera es la caracterización de los músculos, la adquisición y procesamiento de las señales mioeléctricas, la segunda etapa es el filtrado digital y la tercera etapa es el control de una prótesis mecánica de gancho.

El alcance de esta investigación cubre la primera parte del proyecto descrito anteriormente, se seleccionarán los músculos del hombro y la ubicación de los electrodos que permita la mejor adquisición de señales mioeléctricas, mediante un análisis fisiológico y pruebas de conducción eléctrica, con el fin de asistir la investigación en el control de dispositivos de rehabilitación como prótesis mioeléctricas, para personas con pérdida de miembros superiores o movilidad limitada. Para esto se identifican los niveles de amputación, los músculos que intervienen en los movimientos más importantes del hombro y estos se caracterizan por su ubicación. Se realiza posteriormente la selección del sistema de adquisición de señales teniendo en cuenta las características de las señales mioeléctricas.

## 2. AMPUTACIÓN

El proceso de amputación se define como la remoción o resección total o parcial de una extremidad seccionada. Es un acto quirúrgico que provoca un cambio irreversible en la persona sometida a ésta. El nivel al que se realiza es determinante en las competencias futuras del paciente, siendo de peor pronóstico funcional el hecho de tener una amputación más proximal. Los niveles transarticulares presentan mejor pronóstico funcional que los realizados a través del hueso en un nivel inmediatamente superior. Al enfrentar un paciente que requiere una amputación es necesario pensar no solo en salvar la vida sino en conservar posibilidades de independencia y reinserción social.

### 2.1 Niveles de amputación

El nivel de amputación[1] describe el sitio por el que se amputa una parte del cuerpo. Además de otros factores, el nivel de amputación se utiliza para elegir una prótesis adecuada para cada caso, en una intervención quirúrgica planificada, normalmente se consulta también a un técnico ortopédico para determinar el nivel de amputación más favorable para la adaptación posterior de una prótesis. Existe el nivel de amputación de extremidad superior y amputación de extremidad inferior. Esta investigación se concentrará en el primer caso.

La selección de los músculos que se emplean en este estudio depende en gran parte del nivel de amputación con el que se tratara, a continuación se observan los niveles de amputación de miembro superior más comunes, que permiten la adaptación de prótesis. Se delimita la investigación tomando en cuenta los niveles expuestos en la Figura

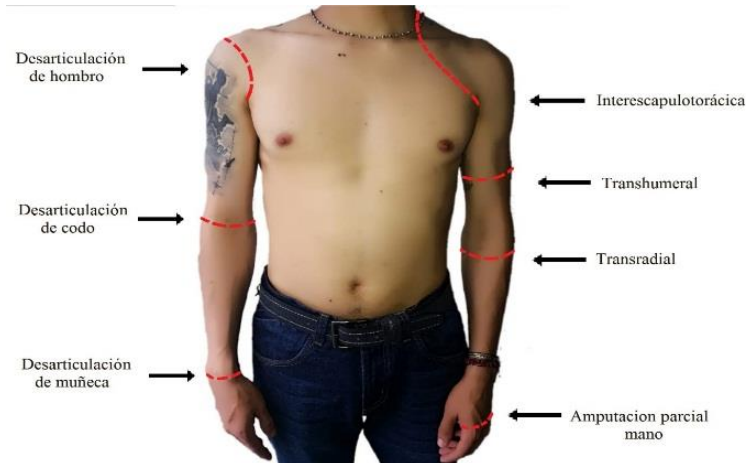
---

<sup>1</sup> [dalbarracin@unisangil.edu.co](mailto:dalbarracin@unisangil.edu.co)

<sup>2</sup> [earias@unisangil.edu.co](mailto:earias@unisangil.edu.co)

<sup>3</sup> [zlopez@unisangil.edu.co](mailto:zlopez@unisangil.edu.co)

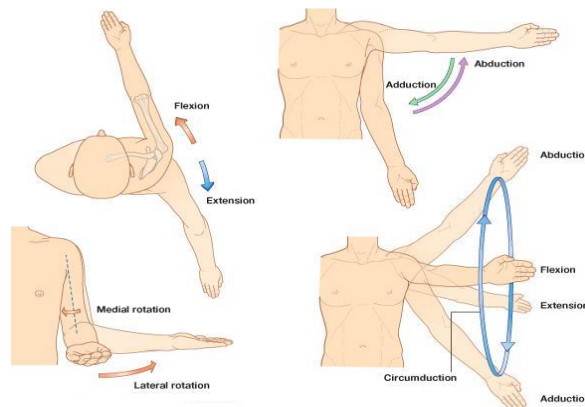
1, y se selecciona como amputación más profunda a estudiar la desarticulación del hombro. Esta conserva los músculos de la caja torácica próximos al hombro y comparte esta cualidad con las amputaciones menos profundas.



**Figura 34.** Niveles de amputación

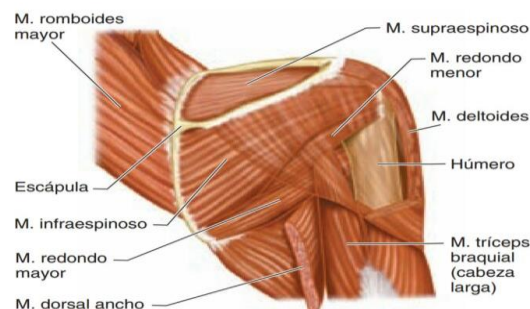
Para la adquisición de las señales se recurrirá a los músculos que se mantengan intactos después de una amputación a nivel del hombro, para seleccionarlos se realiza un estudio de su ubicación anatómica y la posibilidad de realizar en ellos una electromiografía.

- *Movimientos del Hombro* [2]: Debido a que la articulación glenohumeral es esférica. Como se presenta en la Figura 2, los movimientos, que se pueden ejecutar con esta articulación son muy amplios, dentro de ellos se encuentran los siguientes: Extension, flexión, abducción, aducción y circunducción.



**Figura 35.** Movimientos del hombro

- *Músculos Implicados en los Movimientos del Hombro*: Gran parte de la información existente sobre prótesis, controladas por señales eléctricas musculares, se concentra en la adquisición de señales en los músculos que conserva el paciente en el brazo después de una amputación. Los músculos que intervienen en el movimiento del hombro como se identifican en la Figura 3, son: Músculo. pectoral mayor, M. pectoral menor, M. serrato anterior, M. Supraespinoso, M. Infraespinoso, M. redondo mayor, M. redondo menor, M. Subescapular, M. Deltoides, M. Dorsal ancho.



**Figura 3.** Músculos del hombro derecho. Vista posterior. La transparencia parcial del músculo deltoides permite ver los músculos que se encuentran más profundos

- *Anatomía Palpatoria del Hombro* [3]: Teniendo en cuenta que la anatomía palpatoria es una rama de la ciencia que estudia las formas y marcas superficiales del cuerpo y como se relacionan con las estructuras profundas del mismo es importante localizar bien las estructuras para la correcta ubicación de los sensores de músculo mioeléctrico EMG.

El grupo muscular posterior relacionado en la Figura 4 (a) está constituido por músculos de la pared posterior de la axila, y todos se encuentran en contacto directo con la escapula. De todos estos músculos solo el subescapular está ubicado en la parte anterior de este hueso. Los otros cinco se sitúan en la parte posterior de la escapula: Músculo supraespinoso (1), músculo infraespinoso (2), músculo redondo menor (3), músculo redondo mayor (4), músculo dorsal ancho (5). El grupo muscular externo, relacionado en la Figura 4 (b), está conformado solamente por el músculo deltoides, ubicado en la parte lateral del hombro, y compuesto por tres fascículos: fascículo anterior (1), fascículo medio (2), fascículo posterior (3). En la Figura 4 (c), se observa la anatomía palpatoria del grupo muscular interno que lo conforma solamente el músculo serrato anterior. La palpación más accesible de este se encuentra sobre las costillas. El grupo muscular anterior del hombro está conformado solo por dos músculos: Músculo pectoral menor y músculo pectoral mayor en sus tres fascículos (Fascículo clavicular, fascículo esternocostal, fascículo abdominal). Observable en la Figura 4 (d).

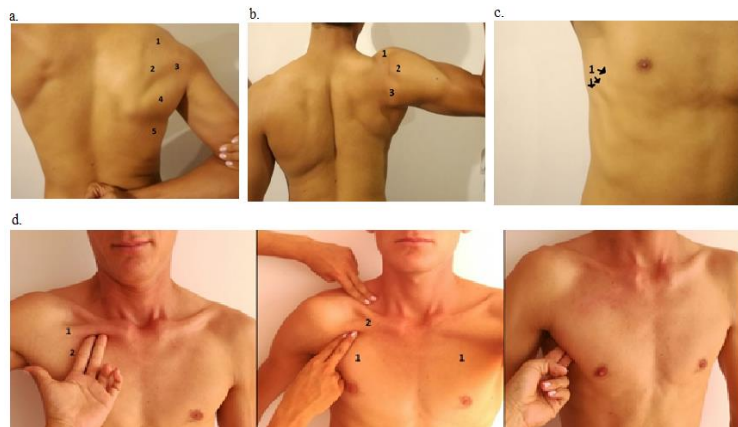


Figura 36. Grupo muscular del hombro

### 3. SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS

“El potencial eléctrico generado por la función de los músculos se denomina electromiograma (EMG). La electromiografía (EMG) es una técnica experimental relacionada con el desarrollo, la grabación y el análisis de señales mioeléctricas. Se puede medir usando electrodos de aguja o electrodos de superficie. El EMG adquirido por electrodos de superficie se llama electromiograma de superficie (sEMG)” [4, 12]. La señal EMG, como se presenta en la Figura 5, generalmente cuenta con unas características eléctricas donde su amplitud “puede oscilar entre 0 y 10 milivoltios (pico a pico) o entre 0 y 1,5 miliamperios (rms). La frecuencia de una señal EMG está entre 0 y 500 Hz. Sin embargo, la energía utilizable de la señal EMG es dominante entre 50-150 Hz.” [4].

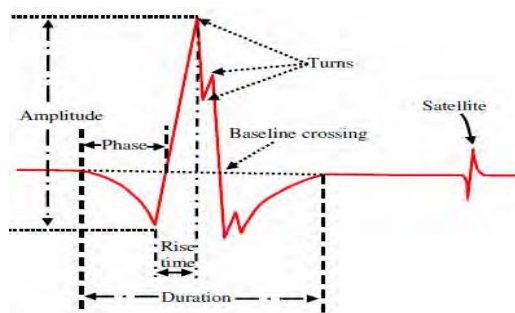


Figura 37. Características de la señal EMG

#### 3.1 Sistema de adquisición de señales

Teniendo en cuenta que un paciente con amputación que requiere este tipo de dispositivos, los cuales son removibles, necesitara quitárselo en algunas circunstancias, de igual modo estar en constante movimiento. Es por ello indispensable proporcionar al paciente, un dispositivo con las características suficientes que detallen comodidad, que ocasionen el menor daño, molestia y/o dolor posible. Dentro de los métodos para la detección de señales electromiográficas se encuentran dos, el método invasivo y el no invasivo. El método no invasivo utiliza electrodos superficiales mientras que el método invasivo emplea electrodos intramusculares.

#### 3.2 Electrodo superficiales

Las señales EMGS, son generalmente obtenidas mediante electrodos bipolares de superficie, ubicados sobre la piel. “Los electrodos superficiales son apropiados para medir potenciales en la superficie del cuerpo; en aplicaciones electrocardiográficas (ECG), electroencefalográficas (EEG) o electromiográficas (EMG). En general, un electrodo consiste en una superficie metálica conectada al instrumento de medida por medio de un conductor. En la parte inferior se coloca un algodón o una gaza empapada con una solución salina, o se aplica gel. Se mantienen en contacto con la piel por medio de correas elásticas, por succión o por medio de superficies adhesivas.” [5]

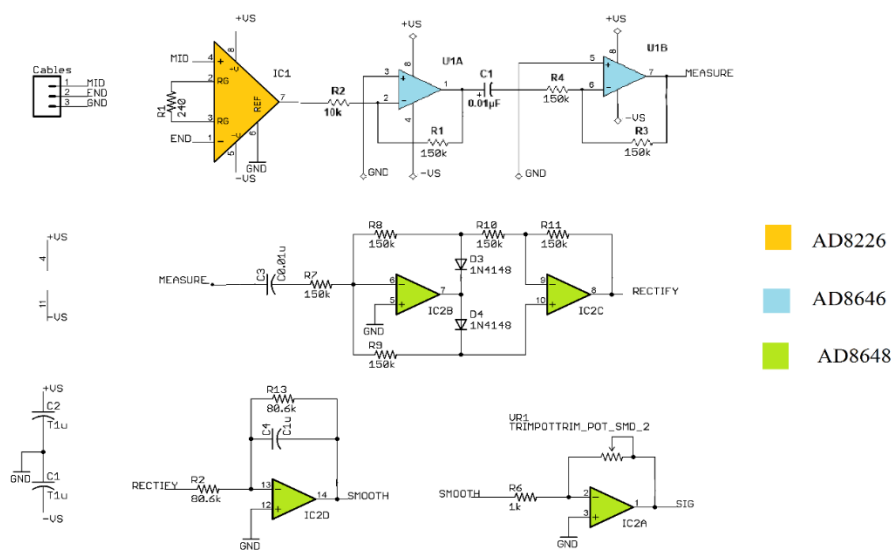
- **Sensor Muscular Mioeléctrico (Modelo SEN\_0708):** El sensor de músculo mioeléctrico modelo SEN\_0708, identificado en la Figura 6, se encuentra en el mercado de Colombia de cómoda adquisición y por sus características es el que más favorece esta investigación, siendo un sensor de señales mioeléctricas que “mide, filtra, rectifica y amplifica la actividad eléctrica de un músculo” [7] permitiendo el control de cualquier extensión artificial a través de los músculos.



**Figura 38.** Sensor de músculo mioeléctrico (Modelo SEN\_0708)

Este sensor Modelo SEN\_0708, lleva incorporado en su placa base un potenciómetro con el cual se puede modificar la relación entre la salida de voltaje y el voltaje producido por el músculo el cual incrementara su señal análoga en relación a la contracción del músculo.

“Para colocarlo a la piel es necesario tres electrodos de almohadillas que se conectan al sensor por medio de broches lo que hace fácil de poner y quitar” [7]. Los electrodos pueden ser colocados directamente a la placa del sensor y un tercero al final de una extensión de cable que trae. Puede haber casos en los que se haga necesario acoplar las almohadillas del sensor lejos del hardware, por lo que este trae otra serie de pines para hacer extensión de los electrodos. El sensor muscular Myoware suple la construcción de un dispositivo para la correcta adquisición de señales mioeléctricas, y es ideal debido a que tiene integrados los amplificadores AD8648, AD8646 y AD8226, además cuenta con cuatro etapas fundamentales pre amplificación, rectificación, filtrado y amplificación (Figura 7).



**Figura 39.** Esquema eléctrico sensor muscular Myoware

### 3.3 Tarjeta NI MyDaq

Teniendo en cuenta el teorema de muestreo de Nyquist, el cual “afirma que se puede hacer una reconstrucción de una señal periódica continua a partir de sus muestras, cumpliendo únicamente con el requisito de que la frecuencia o tasa de muestreo sea de al menos el doble de la frecuencia mayor de la señal a muestrear.”[9] Teniendo en cuenta que el rango de frecuencia en las señales EMG va de los 0 Hz a los 500 Hz, la tarjeta de adquisición NI MyDAQ de National Instruments, que se presenta en figura, cumple con los parámetros establecidos por el teorema anterior, realizando captura de hasta 200KS/s con una resolución de 16 Bits a través de dos canales simultáneamente y permitiendo muestrear las señal mioeléctrica proveniente del sensor muscular Myoware.

Adicionalmente esta tarjeta puede operar con una serie de instrumentos definidos por software listos para ejecutar, Data Logger © National Instruments es una de estas herramientas que facilita la captura y almacenamiento los datos muestreados (Figura 8).

Esta tarjeta de adquisición de datos cuenta con “ocho instrumentos de laboratorio plug-and-play basados en PC usados comúnmente y basados en LabVIEW, incluyendo un multímetro digital (DMM), osciloscopio y generador de funciones” [10].

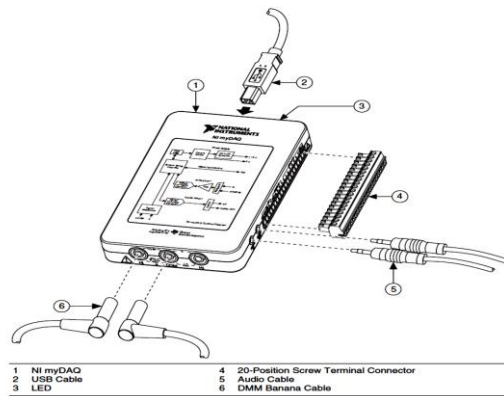


Figura 40. Diagrama de conexión NI myDAQ

#### 4. PRUEBAS DE OBTENCIÓN DE SEÑALES MIOELÉCTRICAS

Los músculos que influyen en los movimientos del hombro son (M. pectoral mayor, M. pectoral menor, M. serrato anterior, M. supraespinoso, M. infraespinoso, M. redondo mayor, M. redondo menor, M. subescapular, M. deltoides y M. Dorsal ancho). Estos músculos poseen diferentes localizaciones y aun cuando sean muy importantes algunos no son palpables exteriormente, por lo que no es posible analizarlos de forma superficial, como es el caso del músculo pectoral menor estando ubicado en la cara lateral de la tercera, cuarta y quinta costillas siendo un músculo no palpable superficialmente, por esta razón se suprime el estudio.

- El *Músculo redondo* menor, situado en la parte posterior es palpable en una extensión muy mínima extensión por lo que se dificulta la correcta colocación del electrodo y se hace inadecuada la obtención de señales en estas fibras musculares.
- El *Músculo dorsal* ancho, es apreciable superficialmente, pero por su forma extendida y plana es imperceptible una ubicación exacta del sensor, lo que en consecuencia se tendría un análisis impreciso.
- El *Músculo supraespinoso*, es palpable a través de las fibras del trapecio y que se hará la adquisición de señales para comprobar que sea posible la obtención de datos en relación a los movimientos del hombro.
- En cuanto al *Músculo pectoral mayor*, constituido por tres fascículos [11], solo es viable analizar el fascículo esternocostal, a razón de que el fascículo clavicular tiene poca masa muscular, de área poco apreciable y adyacente a la clavícula, zona donde se ubican los electrodos de referencia. En cuanto al fascículo abdominal, constituye el borde inferolateral del músculo, por su característica de ubicación posee una mayor cantidad de tejido graso y en relación a los pacientes de sexo femenino las glándulas mamarias están ubicadas en su mayor parte sobre este fascículo, de modo que no es posible analizar estas fibras musculares superficialmente, como se presenta en la Figura 9.

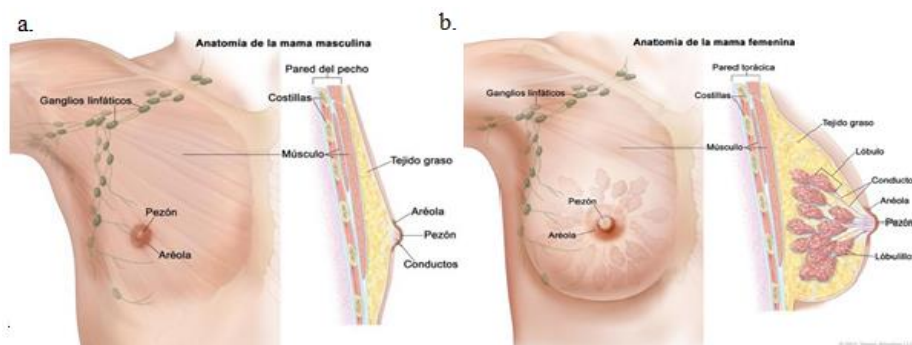


Figura 41. a) Anatomía de la mama masculina b) Anatomía de la mama Femenina

- A pesar, que el *Músculo deltoides* en sus tres fascículos (fascículo medio, fascículo anterior, fascículo posterior) es transcendental e influyente en el movimiento de abducción, no se tiene en cuenta como un músculo que provea las mejores señales para este estudio, teniendo en cuenta que el nivel más alto de amputación del hombro interescapulotorácica en la que desaparece completamente el músculo deltoides seguida de la amputación de desarticulación del hombro, en esta se pierde casi la totalidad del deltoides.
- El *Músculo supraespinoso*, es palpable a través de las fibras del trapecio, sin embargo, el estudio es basado únicamente en la adquisición de señales EMG con método no invasivo, de esta manera las señales superficiales obtenidas no se pueden atribuir a un solo músculo en particular, a esto se suma que el músculo trapecio no interviene en los movimientos del hombro, y que por ende los datos de las señales producidas en esta zona son inadecuados para una correcta caracterización de los músculos que permiten la mejor adquisición de señales en los movimientos del hombro.



- El *Músculo serrato anterior*, ubicado en la cara lateral superior del tronco, es palpable a través de cortas y repetidas inspiraciones, no obstante, se requiere un gran esfuerzo del paciente para que sea perceptible, sumándose a que es un músculo de forma aplanada y solo en una de sus porciones contribuye al movimiento de la abducción del brazo.

Es por lo anterior que se descarta el análisis de los músculos supraespinoso y serrato anterior, entonces se opta por hacer una prueba en los siguientes músculos: M. pectoral mayor (fascículo esternocostal), M. serrato anterior, M. infraespinoso, M. redondo mayor, M. deltoides en sus tres fascículos y en el M. Supraespinoso a través de las fibras del trapecio; tomando muestra para cada uno en los movimientos de abducción, aducción, flexión, extensión, y circunducción. Los movimientos se realizan bajo las siguientes características: Movimiento de abducción hasta los 90° horizontalmente, movimiento de aducción desde los 90° horizontalmente, movimiento de flexión y extensión con posición inicial del brazo en abducción a 90° horizontalmente.

Se ubica el electrodo de referencia del sensor en la extremidad externa (borde anterior) de la clavícula, como se muestra en la Figura 42, debido a que es una zona totalmente huesuda sin fibras musculares. De igual forma se deja inmóvil el electrodo para que la ubicación del electrodo de referencia sea la misma en todas las señales obtenidas de los diferentes músculos con razón de tener más exactitud en el momento del análisis de las señales.



Figura 42. Ubicación de electrodo de referencia

#### 4.1 Prueba 1: Paciente adulto de sexo masculino e índice de masa corporal de 20,9 (I.M.C normal)

Esta prueba se realiza mediante la tarjeta de adquisición MyDaq de Nacional instruments, con dos sensores de electromiografía superficial (Modelo SEN\_0708), en lateral derecho de paciente de sexo masculino y masa muscular normal. El registro de señales EMG de los músculos infraespinoso, redondo mayor y pectoral mayor en los movimientos de abducción, aducción, flexión y extensión se evidencian en la Figura 11.

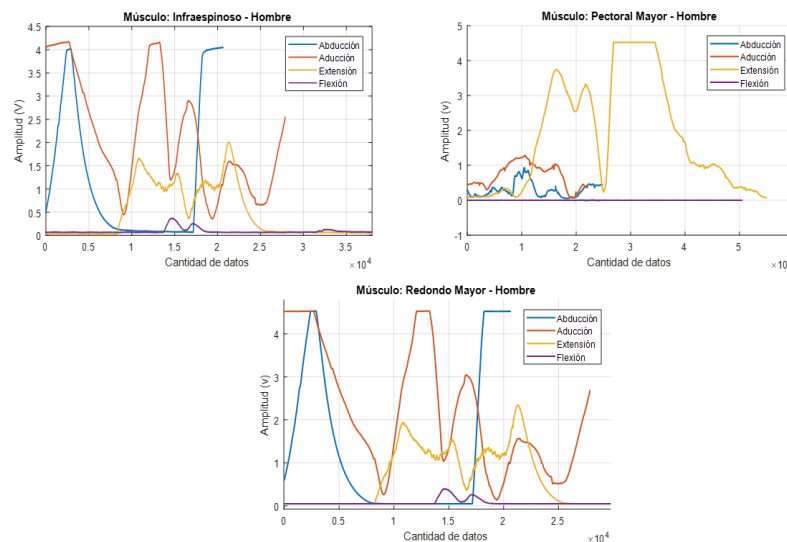


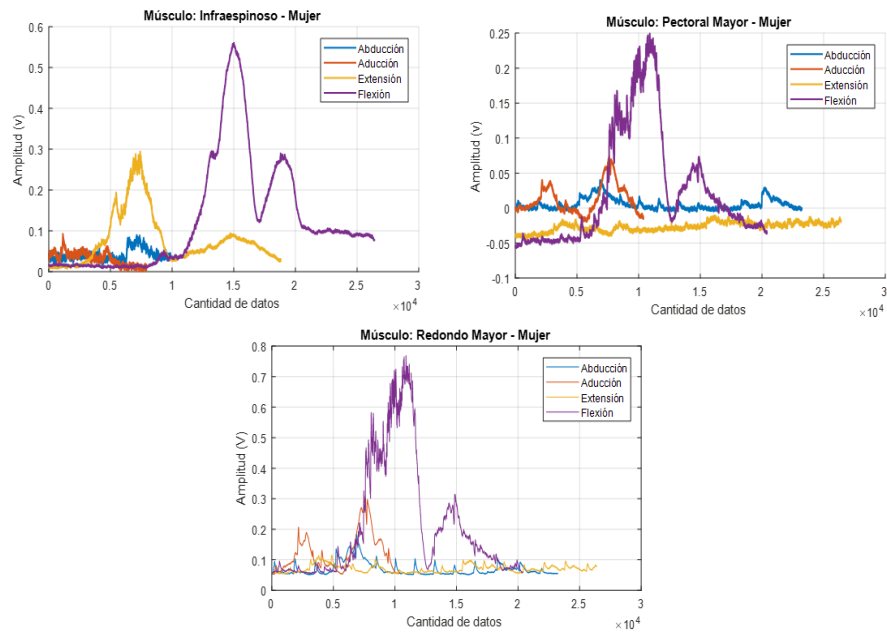
Figura 11. Señales obtenidas en paciente de masculino

#### 4.2 Prueba 2: Paciente adulto de sexo femenino e índice de masa corporal de 18,2 (I.M.C bajo)

Esta prueba se realiza similar a la anterior, mediante la tarjeta de adquisición MyDaq de Nacional instruments, con dos sensores de electromiografía superficial (Modelo SEN\_0708), con un paciente de sexo femenino de poca masa muscular. Los datos obtenidos de cada músculo analizado especialmente pectoral mayor (fascículo esternal) se confrontarán con los adquiridos en el paciente masculino. El registro de señales EMG de los músculos infraespinoso, redondo mayor y pectoral mayor en los movimientos de abducción, aducción, flexión y extensión se muestran en la Figura 12.

Si bien la anatomía muscular del cuerpo humano no discrimina el sexo, la adquisición de señales EMG superficiales en el músculo pectoral mayor en un paciente femenino, se limita a la posibilidad de analizar únicamente su fascículo esternal, teniendo en cuenta que el fascículo abdominal es obstruido superficialmente por la anatomía natural de la

glándula mamaria. Del mismo modo que en el paciente de sexo masculino los electrodos de referencia se ubican en la extremidad esternal (borde anterior) de la clavícula derecha.



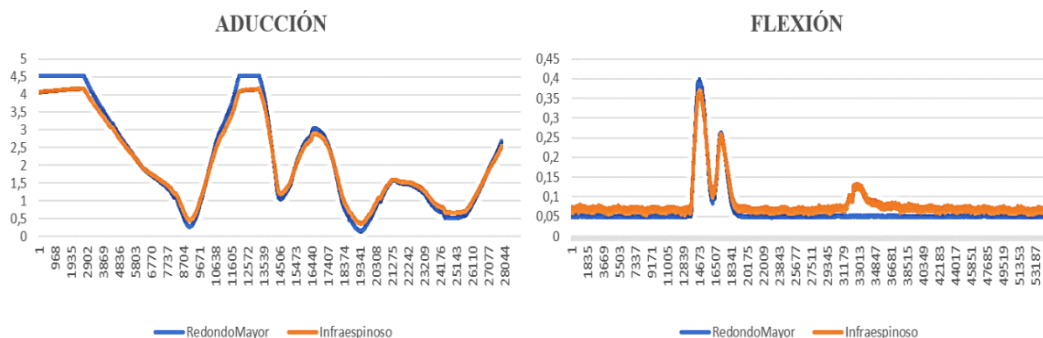
**Figura 12.** Obtenidas en paciente de femenino

Finalmente, los músculos que permiten la mejor adquisición de señales teniendo en cuenta los factores de superficialidad, ubicación, perceptibilidad, presencia de sus fibras en nivel de amputación alta, son los músculos redondo mayor, pectoral mayor en su fascículo medio e infraespinoso. Cabe resaltar los tres músculos son de fácil identificación por lo que el paciente podrá ubicar los sensores de manera sencilla. Un ejemplo de identificación y ubicación se observa en la Figura 13.



**Figura 13.** Ubicación sensor, músculo redondo mayor

Por otra parte, el músculo redondo mayor presenta una similitud en el registro de las señales con respecto a las del músculo infraespinoso, en todos sus movimientos, evidencia de ello se presenta la Figura 14. Lo que permite al paciente ubicar el sensor en cualquiera de los dos músculos, sin alterar el resultado de las señales. Esta característica provee una ventaja, frente a los pacientes que tienen alguno de los dos músculos atrofiados. La ubicación de los sensores en los dos músculos se puede observar en la Figura 435.

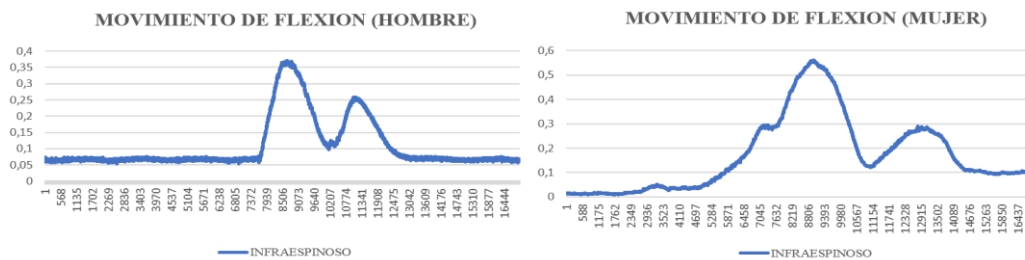


**Figura 14.** Comportamiento señal músculo redondo mayor e infraespinoso



**Figura 435.** Ubicación sensores en músculos infraespinoso y redondo mayor

De igual manera se confirma que los patrones de las señales, en los tres músculos seleccionados, son equivalentes para ambos géneros, cumpliendo de esta manera con la identificación de los músculos que permitan lograr la adquisición de señales para control de sistemas de rehabilitación, sin discriminación de género. El ejemplo del comportamiento de las señales en hombre y mujer se pueden observar en la Figura 16.



**Figura 16.** Comportamiento de las señales en hombre y mujer, músculo infraespinoso (Movimiento de flexión)

## 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como se demuestra en la investigación, la técnica de electromiografía superficial (sMEG), es la que mejor se adapta a las aplicaciones de control, principalmente en instrumentación biomédica. La señal EMG se genera a partir de la actividad eléctrica de los músculos durante su contracción, en el que los tejidos biológicos funcionan como filtros en la distribución de potencial entre el electrodo y las fuentes de señal y aunque la electromiografía invasiva alcanza una mayor precisión en su registro intramuscular, debido a la proximidad de los electrodos a las fuentes, reduciendo la cantidad de ruido en la señal, no posibilita la adquisición de la sumatoria de todos los trenes de potencial de unidades motoras (TPUM) presentes en un músculo, a diferencia de la obtención del electromiograma a través de electrodos superficiales, característica específica que permite un correcto control de sistemas de rehabilitación y monitoreo mediante la contracción de determinados músculos.

Esta técnica además permite que el paciente identifique fácilmente la zona en que se conectan los electrodos, a diferencia del método invasivo en el que sería indispensable el apoyo de un especialista que determine específicamente las diferentes fibras presentes en un músculo y ubique los electrodos. Por otra parte, el método no invasivo garantiza una adquisición EMG sin causar traumatismos adicionales al paciente, considerando que, para cualquier aplicación, el proceso de colocar y remover los electrodos es repetitivo. Realizar el estudio de caracterización de un grupo de determinados músculos, basado en el método de electromiografía superficial (sEMG), genera un avance en la integración de los sensores en la implementación de sistemas de rehabilitación y dispositivos de control.

La ubicación del electrodo de referencia, sin duda es fundamental para la correcta caracterización de un grupo determinado de músculos. El electrodo de referencia del sensor se ubica en una zona huesuda y próxima a las fibras musculares medidas, es preciso afirmar que usar la misma zona de referencia para el análisis de todo el grupo muscular favorece el resultado de un buen estudio de electromiografía, ya que se tendrá el mismo potencial en equilibrio y estable como referente para contrastar el potencial de los electrodos de medición. Dicho lo anterior, la zona de referencia adecuada en la articulación del hombro es la extremidad esternal (borde anterior) de la clavícula.

Los movimientos del brazo sobre la articulación del hombro se realizan mediante las contracciones de diez músculos, sin embargo, no es posible analizarlos en su totalidad por las siguientes razones. Los músculos subescapular y pectoral menor hacen parte del grupo muscular interno del hombro, razón por la cual no es posible estudiarlos mediante electromiografía no invasiva. Los músculos supraespinoso y redondo menor hacen parte del grupo muscular externo, no obstante, tienen sobrepuestos fibras de otros músculos que obstruyen la toma y visualización precisa del electromiograma de la fuente de señal. Por otra parte el músculo pectoral mayor se divide en tres fascículos, todos

externos y palpables, de los cuales solo el esternocostal es adecuado para el estudio, ya que contiene la mayor parte de las fibras musculares del pectoral con menos perturbaciones, diferente del fascículo clavicular que posee menor cantidad de fibras y poco apreciables, además de ser adyacente a la clavícula, zona donde se ubican los electrodos de referencia, razones por las que la señal obtenida no es confiable y de mínima potencia. En cuanto al fascículo abdominal, por constituir el borde inferolateral del músculo posee una significativa cantidad de tejido graso y en relación a los pacientes de sexo femenino las glándulas mamarias están ubicadas en su mayor parte sobre este fascículo, además de estar ubicado justo en la zona cardiaca, donde se genera actividad eléctrica, interfiriendo con la señal real de la fuente.

A diferencia de estos, el deltoides es un músculo generalmente muy perceptible en sus tres fascículos, y anué se confirma que es fuente de excelente señal mioeléctrica, gran parte o inclusive la totalidad de sus fibras musculares se pierden tras una amputación de nivel escapulotorácica y desarticulación del hombro, es preciso decir que para los demás niveles de amputación sería beneficioso el estudio de este.

Algunos músculos siendo externos y palpables, discriminan el análisis en pacientes de poca actividad física. Caso específico del serrato anterior, perceptible a través de cortas y repetidas inspiraciones en pacientes de gran actividad física, que además de requerir un gran esfuerzo para ser apreciable, es un músculo de forma aplanada donde solo una parte de sus fibras musculares interviene en el movimiento de abducción del brazo. De la misma manera el músculo dorsal ancho ubicado en la región lumbar es un músculo plano y triangular que presenta mayor cantidad de tejido graso y que debido a la extensión de su origen, sus fibras musculares pasan en diferentes direcciones, por otro lado la contracción de este músculo puede estar ordenada por un impulso nervioso diferente al relacionado con el movimiento del brazo, lo anterior a razón de que cumple diversas e importantes funciones como contribuir con la inspiración y expiración forzada, además de lo anterior sus fibras musculares se encuentran lejos de la zona de inervación y de la zona de referencia.

## 6. CONCLUSIONES

- La adquisición de la señal EMG está expuesta a interferencias, estas pueden ser biológicas como la actividad eléctrica cardiaca o visceral, y no biológicas de tipo electromagnético como las señales de radio, televisión, telecomunicaciones, telefonía celular, dispositivos electrónicos, línea de alimentación o incluso perturbaciones propias del dispositivo de adquisición. Un buen conjunto de herramientas de adquisición y filtrado son fundamentales para lograr atenuar estas perturbaciones. En este caso el sensor Myoware se alimenta directamente de la tarjeta de adquisición, lo que reduce la presencia de interferencia de la red eléctrica, aun así, este último se alimenta del dispositivo de salida, el cual debe estar desconectado de la red en el momento de la toma de muestras.
- La contaminación de la señal se puede reducir o eliminar con las siguientes medidas; alejando de forma adecuada los dispositivos de la fuente de interferencia, utilizando amplificadores de aislamiento, y preparando adecuadamente la zona de conexión de los electrodos. Es importante señalar que, aunque se usen muy buenas etapas de filtro analógico, el estudio del filtrado digital adaptativo sería muy útil para mejorar los patrones de señal EMG adquiridos, en el momento de aplicarlos en un sistema de control.
- Se determina que los músculos que permiten la mejor adquisición de señales teniendo en cuenta los factores de superficialidad, ubicación, perceptibilidad, presencia de sus fibras en nivel de amputación alta, son los músculos redondo mayor, pectoral mayor en su fascículo medio e infraespinoso.
- Se logra reafirmar que, el índice de masa muscular afecta en la amplitud de las señales producidas en cada movimiento sin alterar su patrón de comportamiento. Por otra parte, el músculo redondo mayor presenta una similitud en el registro de las señales con respecto a las del músculo infraespinoso, en todos sus movimientos permitiendo al paciente ubicar el sensor en cualquiera de los dos músculos, sin alterar el resultado de las señales. Esta característica provee una ventaja, frente a los pacientes que tienen alguno de los dos músculos atrofiados.

## REFERENCIAS

- [1] García, J. (2013). Frecuencia y causas de amputación en pacientes atendidos en la dirección de atención a la discapacidad, por el programa de apoyo de ayudas funcionales del DIF estado de México, 2011-2012. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [2] Suárez, N. & Osorio, A. (2013). Biomecánica del hombro y bases fisiológicas de los ejercicios de Codman. Revista CES Medicina 27(2), 205-2017.
- [3] Tixa, S. (2006). Atlas de anatomía palpatoria. Elsevier.
- [4] Shaw, L. & Bagha, S. (2012). EMG signal analysis for diagnosis of neuromuscular diseases by using PCA and PNN. International Journal of Engineering Science and Technology 4, 4453-4459.
- [5] Reiriz, J. (2006). Sistema Locomotor. Generalidades del sistema Locutor. Enfermera Virtual. Barcelona.
- [6] Tucci, A. (2007). Instrumentación Biomédica. Lulu.
- [7] [Sensor de músculo mioeléctrico](#). Tdrobótica. Online [Nov 2017].
- [8] [Fisiología del proceso contráctil del músculo esquelético](#). Online [Nov 2017].
- [9] Proakis, J. (1996). Digital signal processing: Principles, algorithms, and application. Pearson.
- [10] Nationals Instruments. [myDAQ - Dispositivo de Adquisición de Datos para Estudiantes](#). Online [Dec 2017].
- [11] Thibodeau, G., Patton, K. & Howard, K. (1998). Estructura y Función. Elsevier.
- [12] Alva, C. (2012). Procesamiento de señales de electromiografía superficial para la detección de movimiento de dos dedos de la mano. Universidad Ricardo Palma.

Tatiana A. Castañeda<sup>1</sup>  
Jully V. Rivero<sup>2</sup>  
Jonathan D. Morales<sup>3</sup>  
Universidad Santo Tomás  
Bucaramanga – Colombia

Los Indicadores hacen parte de los sistemas de gestión y tienen la función de cuantificar los resultados obtenidos dentro de la implementación de los ciclos PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar), su importancia radica en ser la herramienta más efectiva para la identificación del desempeño de un proceso y toma de decisiones [1], es por esto que el sector gubernamental en Colombia ha mostrado un especial interés en promover la gestión ambiental en sus territorios implementado un sin número de estrategias a fin de lograr involucrar al sector productivo en la consolidación de datos que generen información sobre la gestión de las diferentes empresas que operan en sus jurisdicciones. La investigación fue realizada en una Institución prestadora de servicios de salud de alta Complejidad la cual obtenía resultados desfavorables en las metas de sus indicadores de gestión ambiental adoptados como herramienta para monitorear su desempeño ambiental, debido a que su programa ambiental no contaba con una metodología lógica para la identificación y valoración de aspectos ambientales así como la priorización de estrategias de control y cálculo de los indicadores de gestión ambiental acordes a la complejidad de la institución. Los objetivos de este trabajo de investigación fueron proponer una metodología para la implementación, evaluación y análisis de indicadores de gestión ambiental específica para el sector salud en Colombia, compatible con la Legislación Ambiental y siguiendo los principios y lineamientos de la norma ISO 14031 como herramienta de gestión corporativa que por medio del diseño de indicadores de gestión proporciona información verificable a fin de identificar si el desempeño ambiental de la organización cumple con la calidad esperada del sistema, buscando fortalecer los programas de gestión ambiental a nivel institucional y brindando oportunidades de modelación de acuerdo a los esfuerzos realizados por las empresas con el objetivo de prevenir, mitigar y controlar sus impactos ambientales además de presentar beneficios económicos sociales. El proyecto se desarrolló en tres etapas en las cuales se generó un diagnóstico cuantitativo y cualitativo de la situación actual de la institución donde se valoraron criterios extraídos de la norma ISO 14031 y se establecieron fortalezas y debilidades de la institución, una vez desarrollada la evaluación inicial se procedió al desarrollo del “Referencial para la Metodología Evaluación del Desempeño Ambiental Sector Salud en Colombia”, el cual se fundamentó bajo el ciclo PHVA generando directrices y recomendaciones que permitan que una entidad prestadora de salud fortalezca la planeación, análisis y comunicación de su Desempeño Ambiental, en el desarrollo de la tercera etapa, se realizó la implementación de los criterios establecidos en el referencial finalizando con el análisis de los resultados obtenidos en los indicadores de gestión ambiental una vez implementada la metodología.

## 1. INTRODUCCIÓN

Como objeto de estudio de la presente investigación se identificó una Institución de salud de cuarto nivel de complejidad acreditada a nivel nacional, que ha implementado un programa ambiental como resultado de la necesidad de dar cumplimiento a un marco normativo y a unos criterios de calidad establecidos por el sistema de acreditación en salud (Decreto 1011 de 2006), dicho programa se fundamenta bajo una Política Institucional que contempla las estrategias implementadas para garantizar el desarrollo de sus aspectos ambientales enfocados al control de la contaminación y la degradación del medio ambiente [2], las cuales son planificadas y medidas por medio de unos indicadores de gestión ambiental diseñados con el fin de medir los índices de generación de residuos, y los niveles de consumo de recursos naturales, utilizando metodologías de cálculo que tienen en cuenta la productividad institucional:

- Índice de generación de residuo peligroso kg/ cama día
- Índice de generación de residuo ordinario Kg/ cama día
- Índice de generación de residuo reciclable Kg / cama día
- Índice de consumo de agua M<sup>3</sup>/ cama día
- Índice de consumo de energía KWH/ cama día

Estos indicadores muestran los niveles de generación y consumo medidos desde la productividad del servicio asistencial de la institución, pero no generaban valor al momento de analizar el desempeño ambiental de la institución debido a que, por su misma complejidad, se habían identificado datos no tenidos en cuenta en el diseño de sus métodos de cálculo los cuales afectaban de manera importante la información allí reflejada y por tanto perdían su enfoque al

---

<sup>1</sup> *Tcastanedasanchez274@gmail.com*

<sup>2</sup> *vanesa.rivero.gutierrez@gmail.com*

<sup>3</sup> *moralessmendez09@gmail.com*

momento de ser analizados. Dentro de las causas identificadas se refleja que las fuentes generadoras de información no son compatibles con los criterios tenidos en cuenta en las fórmulas de cálculo de los indicadores, por ejemplo: la información usada no discrimina la productividad del servicio ambulatorio de la clínica lo cual genera un subregistro en la productividad del servicio hospitalario inflando los índices de generación y causando dificultad en la toma de decisiones.

Al no adoptar una metodología lógica para la planeación de la gestión ambiental en la institución se generaba incumplimiento de metas e ineficientes planes de acción en la búsqueda de resultados que propendan al mejoramiento del desempeño ambiental institucional, motivo por el cual se inició un proceso de investigación orientado a la búsqueda de ideas para innovar y apoyar a entidades prestadoras de servicios de salud en Colombia. El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología de implementación, evaluación y análisis de indicadores de gestión ambiental que facilite la aplicabilidad de la evaluación del desempeño ambiental descrita en la Norma ISO 14031 versión 2016, como herramienta de gestión corporativa que por medio de indicadores de gestión proporciona información verificable.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en una institución prestadora de servicios de salud con servicios habilitados hasta el cuarto nivel de complejidad ubicada en el Departamento de Santander Colombia. Donde para el diagnóstico de su sistema de medición de indicadores de gestión ambiental se crearon herramientas de evaluación teniendo en cuenta los lineamientos de la norma la Norma Técnica ISO 14031 Evaluación del desempeño Ambiental Versión 2016, a fin de establecer fortalezas y debilidades. Dicho diagnóstico se dividió en tres etapas:

1. Elaboración de la herramienta de evaluación del Sistema de Medición, Indicadores de Gestión Ambiental.
2. Aplicación de la Herramienta de Evaluación del Sistema de Medición, Indicadores de Gestión Ambiental.
3. Resultados del Diagnóstico del Sistema de Medición de los Indicadores de Gestión Ambiental estableciendo fortalezas y debilidades.

### 2.1 Herramienta de evaluación sistema de medición, indicadores de gestión ambiental

La herramienta de evaluación del Sistema de Medición, Indicadores de Gestión Ambiental, se desarrolló basado en el modelo de autoevaluación del estándar de gerencia del ambiente físico donde se encuentran inmersos los criterios de gestión ambiental del Manual de Acreditación en Salud Ambulatorio y Hospitalario Versión 003, elaborado por la unidad sectorial de Normalización en salud de Colombia [3]. “Decreto 1011 de 2006 por el cual se establece el sistema obligatorio de garantía de la calidad de la atención de salud del sistema general de seguridad social en salud Resolución 0123 de 2012 [4]. El contenido de la herramienta de evaluación se divide en ocho (8) Estándares modelados según los numerales de la norma técnica ISO 14031 Evaluación del Desempeño Ambiental, cada uno de ellos contiene los diferentes criterios mencionados en los numerales de la norma anteriormente mencionada.

La identificación parte de un ejercicio de análisis interpretativo de la situación ambiental, de los procesos de la Institución Objeto de estudio que están asociados a los aspectos ambientales; continuando con la valoración del desempeño ambiental asociada a variables que permiten cuantificar el cumplimiento normativo [5], para esta identificación se diseñó una herramienta, la cual incluye las decisiones y procesos que deben ser tenidos en cuenta en la organización para que la funcionalidad de la estructura colabore con el adecuado funcionamiento de los procesos asistenciales. La herramienta está estructurada con dos columnas, la primera nombra el estándar a evaluar y frente a cada estándar, se encuentra una columna en la cual la institución debe precisar el grado de cumplimiento teniendo en cuenta cada uno de los criterios inmersos en cada estándar. Como se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Herramienta de evaluación del desempeño ambiental

<b>Evaluación del desempeño ambiental</b>					
Estándar 1: Existen mecanismos en la institución para la priorización de los impactos ambientales ligados al proceso misional de la institución (Requisito 4.2)	5	4	3	2	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La organización cuenta con una evaluación de impacto ambiental que describa las actividades susceptibles a producir impactos ambientales.</li> <li>▪ La organización contempla dentro de su evaluación de impacto ambiental la descripción del entorno afectado por sus operaciones.</li> <li>▪ Existe una matriz de evaluación de impacto ambiental como mecanismo para identificar y cuantificar los aspectos e impactos ambientales asociados a los procesos de la organización.</li> <li>▪ La evaluación de impacto ambiental incluye medidas preventivas, correctivas y de control de los aspectos ambientales asociados.</li> <li>▪ La evaluación de impacto ambiental contempla la vigilancia y seguimiento de los aspectos e impactos ambientales priorizados en la matriz de evaluación de impacto ambiental.</li> </ul>					
Estándar 2: Se cuenta con una política ambiental donde se represente el compromiso con la evaluación y el mejoramiento continuo del desempeño ambiental de la institución (Requisito 4.2.1.2 – Requisito 5.2 norma ISO 14001)	5	4	3	2	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La política ambiental de la organización es apropiada al propósito y contexto de la organización, incluye la naturaleza magnitud e impactos ambientales de sus actividades, productos y servicios.</li> <li>▪ La política ambiental de la organización proporciona un marco de referencia para el establecimiento de los objetivos ambientales.</li> <li>▪ La política ambiental incluye un compromiso para la protección del medio ambiente incluye la prevención de la contaminación y otros compromisos específicos pertinentes al contexto de la organización.</li> <li>▪ La política ambiental incluye un compromiso de cumplimiento de los requisitos legales y otros requisitos.</li> <li>▪ La política ambiental incluye un compromiso de mejora continua del sistema de gestión ambiental para la mejora del desempeño ambiental.</li> <li>▪ La política ambiental debe mantenerse como información documentada, comunicarse dentro de la organización, Estar disponible para las partes interesadas.</li> </ul>					

Estándar 3: La organización selecciona los indicadores clave de desempeño como un medio para la presentación de datos o información cuantitativa o cualitativa de una formas más comprensible y útil. (Requisito 4.2.2.3)	5	4	3	2	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>La organización compara su desempeño ambiental con su política ambiental, objetivos, metas, requisitos legales y otros que sean aplicables.</li> <li>Los indicadores para la evaluación del desempeño ambiental se pueden agregar o ponderar, según sea apropiado, a la naturaleza de la información y su uso previsto.</li> <li>Los indicadores de desempeño ambiental permiten que la dirección cuente con información suficiente para entender el efecto que cualquier objetivo de desempeño ambiental tiene sobre los elementos de las operaciones de la organización.</li> </ul>					
Estándar 4: La evaluación del desempeño ambiental de la organización representan una herramienta para determinar las acciones necesarias para lograr sus objetivos de desempeño ambiental (Requisito 4.3)	5	4	3	2	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>La evaluación del desempeño ambiental de la organización permite identificar los aspectos ambientales significativos.</li> <li>La evaluación del desempeño ambiental de la organización permite identificar oportunidades para mejorar la gestión de sus aspectos ambientales.</li> <li>La evaluación del desempeño ambiental de la organización permite identificar las tendencias de su comportamiento ambiental.</li> <li>La evaluación del desempeño ambiental de la organización permite aumentar la eficiencia y eficacia de la organización.</li> <li>La evaluación del desempeño ambiental de la organización permite identificar oportunidades estratégicas.</li> <li>La organización revisa periódicamente los indicadores de gestión ambiental para identificar oportunidades de mejora del proceso de la Evaluación del Desempeño Ambiental.</li> <li>La organización recopila datos regularmente proporcionando entradas para el cálculo de los valores de los indicadores seleccionados para la evaluación del desempeño ambiental de forma sistemática, fuentes apropiadas con frecuencia coherente y planificación definida.</li> </ul>					
Estándar 5: ¿La evaluación del desempeño ambiental de la organización asegura la fiabilidad en los procedimientos de recopilación de los datos su análisis y conversión? (Requisito 4.3.2 - 4.3.3)	5	4	3	2	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>La Recopilación de los datos se apoya con prácticas de control y aseguramiento de la calidad asegurando que los datos obtenidos son del tipo y de la calidad necesarios para el uso de la EDA.</li> <li>Los procedimientos para la recopilación de los datos incluyen la identificación apropiada, el archivo, el almacenamiento, la recuperación y disposición de datos y la información.</li> <li>Los datos recopilados se analizan y se convierten en información que describe el desempeño ambiental de la organización expresados como indicadores para la EDA.</li> <li>El análisis de los datos incluye consideraciones sobre la calidad de los datos, validez, adecuación y si son suficientes para producir información fiable.</li> </ul>					
Estándar 6: ¿La evaluación del desempeño ambiental de la organización es planificada de acuerdo con sus objetivos de desempeño ambiental? (Requisito 4.3.4)	5	4	3	2	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>Los objetivos de desempeño ambiental son planificados de acuerdo con resultados actuales y anteriores.</li> <li>Los objetivos de desempeño ambiental tienen un componente de cumplimiento de requisitos legales.</li> <li>Los objetivos de desempeño ambiental están de acuerdo con normas y metodologías de buenas prácticas.</li> <li>Los objetivos de desempeño ambiental cuentan con un componente de evaluación de desempeño de otras organizaciones del sector.</li> <li>Los objetivos de desempeño ambiental son planificados de acuerdo con revisiones y auditorias de gestión previas.</li> <li>Los objetivos de desempeño ambiental tienen en cuenta las partes interesadas.</li> <li>Los objetivos de desempeño ambiental tienen en cuenta la implementación de avances científicos y tecnológicos.</li> </ul>					
Estándar 7: ¿Existe una metodología para la comunicación de la eda? (Requisito 4.3.5)	5	4	3	2	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>La comunicación del desempeño ambiental debería ser parte del plan de comunicación de la organización.</li> <li>Los resultados de la Evaluación del Desempeño Ambiental son comunicados a las partes interesadas dentro y fuera de la institución.</li> <li>La comunicación del desempeño ambiental aumenta la toma de conciencia y el dialogo sobre las políticas ambientales de la organización, objetivos de desempeño ambiental y logros pertinentes.</li> <li>La comunicación del desempeño ambiental demuestra el compromiso de la organización y los esfuerzos de la organización.</li> <li>La comunicación del desempeño ambiental proporciona un mecanismo para responder a las inquietudes y preguntas sobre los aspectos ambientales de la organización.</li> <li>La comunicación del desempeño ambiental incluye las tendencias de sus indicadores evaluados.</li> <li>La comunicación del desempeño ambiental incluye el nivel de cumplimiento normativo.</li> <li>La comunicación del desempeño ambiental incluye la disponibilidad de los recursos naturales y los resultados de sus controles operativos.</li> <li>La comunicación del desempeño ambiental debe incluir los ahorros de costes o impactos financieros producto de la gestión ambiental implementada.</li> <li>La comunicación del desempeño ambiental debe incluir las oportunidades y riesgos ambientales que pueden impactar la organización.</li> </ul>					
Estándar 8: ¿Existe una metodología para la revisión y la mejora de la evaluación del desempeño ambiental? (Requisito 4.4)	5	4	3	2	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>La evaluación del desempeño ambiental de la organización se revisa periódicamente para identificar oportunidades de mejoramiento.</li> <li>La revisión debe incluir las acciones de la dirección para mejorar el desempeño de la gestión y las operaciones de la organización.</li> <li>La metodología de revisión de la mejora continua debe considerar la evaluación del desempeño ambiental como la herramienta de mejoramiento continuo del sistema de gestión ambiental de la organización.</li> </ul>					

Este modelo evaluativo adopta el sistema de calificación establecido en la Resolución 2082 de 2014 [6]. Dicho proceso autoevaluativo de los estándares de acreditación involucra la identificación de las siguientes dimensiones en el cumplimiento:

- **Enfoque:** Hace referencia a la planeación de directrices, métodos y procesos que en forma sistémica y metódica utiliza la institución para ejecutar y lograr el propósito solicitado en cada estándar y la forma en que se evaluó y mejora.
- **Implementación:** Refiere al despliegue y aplicación de lo planeado en el enfoque a su alcance extensión a los procesos de la entidad que aplique.
- **Resultados:** Refiere a los logros y efectos alcanzados con la aplicación de los enfoques.

La evaluación de los estándares se realizó de dos formas:

1. **Evaluación Cualitativa:** Incluye la definición de fortalezas y oportunidades de mejora para cada estándar teniendo en cuenta el grado de cumplimiento y de las dimensiones de enfoque implementación y resultados.



2. Evaluación cuantitativa: Incluye la asignación de valores al grado de avance en la implementación de los estándares establecidos para dar cumplimiento a la norma teniendo en cuenta la hoja radar de calificación propuesta por la Resolución

Este ejercicio se debe realizar con cada uno de los estándares establecidos en la herramienta de evaluación. Para la consolidación de las calificaciones asignadas a cada uno de los estándares evaluados se creó una herramienta para la consolidación de los datos a fin de facilitar la metodología de identificación de fortalezas y debilidades del Sistema de Medición, Indicadores de Gestión Ambiental. La cual se describe en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Calificación del diagnóstico de evaluación del desempeño ambiental

Calificación diagnóstico de evaluación del desempeño ambiental										Fecha:
Estándares	Enfoque			Implementación			Resultados			Calificación promedio
	Enfoque sistémico	Proactividad	Enfoque evaluado y mejorado	Despliegue en la institución	Aprobación por el cliente interno o externo	Pertinencia	Consistencia	Avance de la medición	Tendencia	
Estándar 1										
Estándar 2										
Estándar 3										
Estándar 4										
Estándar 5										
Estándar 6										
Estándar 7										
Estándar 8										
Calificación de la edad			Mínimo	Promedio	Máximo	Sumatoria			Ponderado	

## 2.2 Calificación del diagnóstico de evaluación del desempeño ambiental

Una vez aplicado el diagnóstico se procederá a evaluar el nivel de desempeño ambiental actual de la institución objeto de estudio, para ello se formulará un matriz semáforo (Tabla 3), a la cual se le asignaron los niveles de cumplimiento Bajo Grado de Cumplimiento (Rojo), Medio Grado de Cumplimiento (Amarillo), Alto grado de cumplimiento (Verde).

**Tabla 3.** Matriz Semáforo aplicada a la Evaluación del Desempeño Ambiental

Puntaje	Descripción	Color
1 - 2	Bajo grado de cumplimiento	Rojo
2.1 - 3.5	Medio grado de cumplimiento	Amarillo
3.6 - 5	Alto grado de cumplimiento	Verde

Según la autoevaluación realizada por el responsable del programa Ambiental en la Clínica Objeto de estudio en acompañamiento con su asesor de calidad se asignaron los puntajes teniendo en cuenta los criterios que menciona la herramienta de evaluación del desempeño ambiental y la guía de calificación de los estándares. La calificación general de la Evaluación del Desempeño Ambiental de la institución fue de 2.42 lo cual según los criterios de calificación obtenida se considera prioritariamente la implementación de la norma Técnica ISO 14031 "Evaluación del Desempeño Ambiental" toda vez que es de gran importancia establecer acciones de mejora para dar un enfoque sistemático a los indicadores de gestión ambiental establecidos por la institución.

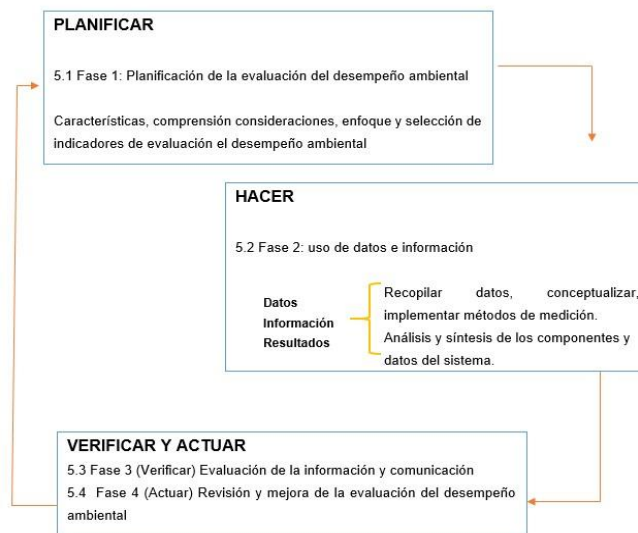
La herramienta de evaluación permitió un análisis cualitativo, donde se identificaron las fortalezas y debilidades de la Institución Objeto de Estudio y el nivel de cumplimiento de la Norma Técnica ISO 14031 "Evaluación del Desempeño Ambiental", dejando como resultado la importancia de establecer un referencial que apoye la implementación de la norma anteriormente mencionada y la priorización de actividades para el mejoramiento de desempeño ambiental [7].

## 3. MODELO DE GESTIÓN PARA EL CONTROL DE INDICADORES MEDIOAMBIENTALES EN SALUD

Como estrategia para fortalecer el desempeño ambiental institucional de la clínica Objeto de Estudio se diseñó el "Referencial para la Metodología evaluación del desempeño ambiental sector salud en Colombia Norma ISO 14031", el cual proporciona directrices sobre el diseño y uso de la evaluación del desempeño ambiental de instituciones prestadoras de servicios de salud.

### 3.1 Estructura del modelo de sistemas de control de indicadores ambientales

El referencial se estructuró bajo el ciclo de Deming (PHVA) fundamentado en los principios establecidos por la norma ISO 14031 Pertinencia, Credibilidad, Coherencia, Comparabilidad, Transparencia, Integridad, Exactitud e Idoneidad (Figura 1), diseñada a permitir que una entidad prestadora de servicios de salud fortalezca la planeación, análisis y comunicación de los indicadores ambientales con el objetivo de controlar los aspectos ambientales identificados en el proceso de prestación de servicios de salud, mejorando su competitividad, disminuyendo sus costos operativos en cada uno de sus procesos misionales y de apoyo, dando cumplimiento a la normatividad ambiental vigente [8].



**Figura 1.** Esquema de “Referencial para la metodología evaluación del desempeño ambiental” diseñada según modelo PHVA

#### 4. REFERENCIAL PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE INDICADORES DE GESTIÓN AMBIENTAL

El Referencial para la Metodología Evaluación del Desempeño Ambiental Sector Salud en Colombia fue diseñado a fin de generar una herramienta para la implementación de la Norma Técnica ISO 14031 Versión de 2016 específica para las entidades prestadoras de servicios de salud, el Documento se generaron cuatro fases para la implementación de la Norma, teniendo en cuenta el ciclo PHVA:

- En la fase 1 “Planear” Se describen las generalidades para el Diseño de Indicadores de Gestión Ambiental, teniendo en cuenta los aspectos ambientales como requisito base para la priorización de la gestión para el mejoramiento del desempeño ambiental, características propias de los indicadores para la Evaluación del desempeño ambiental, Consideraciones para la selección de indicadores de gestión ambiental.
- Fase 2 “Hacer” Se describe el uso de la información obtenida en la evaluación del desempeño ambiental, la recopilación de datos, La conceptualización del sistema, la identificación de las fuentes de datos, Métodos de medición, consolidación de los parámetros de medición y Análisis y conversión de los datos.
- Fase 3 “Verificar” Se describen metodologías para la evaluación de la información, y herramientas para el manejo de la información y la comunicación de los resultados, teniendo en cuenta las diferentes partes interesadas.
- Fase 4 “Actuar” Describe herramientas para la Revisión y Mejora de la Evaluación del Desempeño Ambiental.

##### 4.1 Validación del referencial

Una vez realizado el referencial y aprobado el documento, se procede a la búsqueda de dos evaluadores expertos en gestión ambiental y calidad en salud, quienes se encargaron de analizar el contenido del referencial a fin de validar si el documento es aplicable para entidades prestadoras de servicios de salud en Colombia, tal como lo describe su objeto y campo de aplicación. Para dar cumplimiento a esta necesidad se eligieron los evaluadores expertos:

1. Experto técnico en gestión ambiental
2. Médico Auditor como experto técnico en calidad en salud

El referencial obtuvo una calificación ponderada de 96.5 puntos por parte de los expertos técnicos aprobando su publicación.

##### 4.2 Validación de la metodología

Establecimiento de la línea base. De acuerdo con el diagnóstico realizado en la institución con la herramienta de cumplimiento de los requisitos establecidos en la NTC ISO 14031 versión se define que la institución tiene un nivel de cumplimiento del 48% del total de los criterios para los cuales se obtuvo una calificación 2,42 cuyo puntaje máximo posible es 5. De acuerdo con la línea Base para la implementación de la metodología de Evaluación del Desempeño Ambiental, se establecen actividades y metas según El sistema de Acreditación en Salud de la Clínica Objeto de Estudio, donde se define que, para alcanzar un nivel de cumplimiento considerable para ser una institución acreditada, debe obtener una calificación mínima de 3,5 lo que corresponde a un nivel de cumplimiento del 70% de los requisitos de la norma.

Para el logro de estas metas se utilizó el instrumento de planificación adoptado por La institución Objeto de Estudio con el fin de trazar una ruta lógica para el alcance de los objetivos teniendo en cuenta el periodo de tiempo para su realización y los responsables de la implementación, a fin de trabajar de forma coordinada. En su elaboración se

formula un objetivo general relacionado con cada actividad descrita en el plan, se priorizan según su relevancia y se determinan recursos, tiempos de entrega y responsables para el logro de las acciones dispuestas en el plan.

**Tabla 4.** Línea base para la implementación de la metodología evaluación del desempeño ambiental

Estándar	Diagnóstico		Implementación Metodología	
	Calificación	Cumplimiento	Acciones	Meta
Estándar 1: Existen mecanismos en la institución para la priorización de los impactos ambientales ligados al proceso misional de la institución (requisito 4.2)	2,7	54%	Actualizar y fortalecer la matriz de evaluación de impacto ambiental como herramienta para la priorización de los impactos ambientales asociados al proceso misional de la institución.	Incrementar el nivel de cumplimiento de los criterios establecidos en el estándar en un 16%
Estándar 2: Se cuenta con una política ambiental donde se represente el compromiso con la evaluación y el mejoramiento continuo del desempeño ambiental de la institución (requisito 4.2.1 – requisito 5.2 norma ISO 14001)	2,8	56%	Actualizar la Política Ambiental institucional, teniendo en cuenta las estrategias necesarias para la implementación de la metodología de la evaluación del desempeño ambiental acorde con la norma ISO 14031 Versión 2016 y las partes interesadas y análisis del contexto	Incrementar el nivel de cumplimiento de los criterios establecidos en el estándar en un 12%
Estándar 3: la organización selecciona los indicadores clave de desempeño como un medio para la presentación de datos o información cuantitativa o cualitativa de una forma más comprensible y útil. (requisito 4.2.2.3)	2,5	50%	Evaluar los indicadores con los que cuenta la institución para la evaluación de su desempeño ambiental y actualizar sus respectivas fichas técnicas.	Incrementar el nivel de cumplimiento de los criterios establecidos en el estándar en un 20%
Estándar 4: la evaluación del desempeño ambiental de la organización representan una herramienta para determinar las acciones necesarias para lograr sus objetivos de desempeño ambiental (requisito 4.3)	2,7	54%	Actualizar la Política Ambiental institucional, teniendo en cuenta las estrategias necesarias para la implementación de la metodología de la evaluación del desempeño ambiental acorde con la norma ISO 14031 Versión 2016 y las partes interesadas y análisis del contexto	Incrementar el nivel de cumplimiento de los criterios establecidos en el estándar en un 16%
Estándar 5: ¿la evaluación del desempeño ambiental de la organización asegura la fiabilidad en los procedimientos de recopilación de los datos su análisis y conversión? (requisito 4.3.2 – 4.3.3)	2,7	54%	Diseñar un procedimiento basado con el ciclo PHVA - a fin de diseñar, gestionar indicadores con las acciones necesarias para la recopilación de datos el cálculo y análisis de indicadores.	Incrementar el nivel de cumplimiento de los criterios establecidos en el estándar en un 16%
Estándar 6: ¿la evaluación del desempeño ambiental de la organización es planificada de acuerdo a sus objetivos de desempeño ambiental? (requisito 4.3.4)	2	40%	Evaluar los indicadores con los que cuenta la institución para la evaluación de su desempeño ambiental y actualizar sus respectivas fichas técnicas.	Incrementar el nivel de cumplimiento de los criterios establecidos en el estándar en un 30%
Estándar 7: ¿existe una metodología para la comunicación de la EDA? (requisito 4.3.5)	1,2	24%	Elaborar una metodología para la comunicación del desempeño ambiental - Teniendo en cuenta los medios pertinentes y las partes interesadas	Incrementar el nivel de cumplimiento de los criterios establecidos en el estándar en un 46%
Estándar 8: ¿existe una metodología para la revisión y la mejora de la evaluación del desempeño ambiental? (requisito 4.4)	2,8	56%	Diseñar estrategias para revisión, mejora y toma de decisiones y ejecución de acciones para la mejora continua de la Evaluación del desempeño ambiental.	Incrementar el nivel de cumplimiento de los criterios establecidos en el estándar en un 14%
Promedio Ponderado	2,42	48%	Implementar la metodología para la Evaluación del desempeño ambiental, basados en la norma ISO 14031	Incrementar el nivel de cumplimiento de los criterios establecidos en la norma en un 22%

## 5. IMPACTOS O VARIACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN

Una vez implementadas las estrategias de mejoramiento para la implementación de la metodología de Evaluación del desempeño ambiental, se define el registro de datos para el periodo del segundo semestre del año 2017, donde se aplicará la metodología de semaforización para el análisis del cumplimiento de metas de los indicadores de gestión ambiental [9]. A fin de mostrar de manera gráfica impactos o variación en la implementación se define mostrar el comportamiento del indicador desde el primer semestre del año 2015.

### 5.1 Indicadores de gestión ambiental año 2015 institución objeto de estudio

- *Generación de residuo peligroso año 2015.* El incremento de los residuos peligrosos en este año ha sido notorio debido a los cambios realizados en el proceso de segregación donde se incluyeron materiales que estaban siendo

considerados reciclables a residuos considerados de carácter peligroso (Figura 2). En este año también se realizaron cambios en las metas de generación de residuos aumentándose de 0.28 a 0.37 kg/cama día.

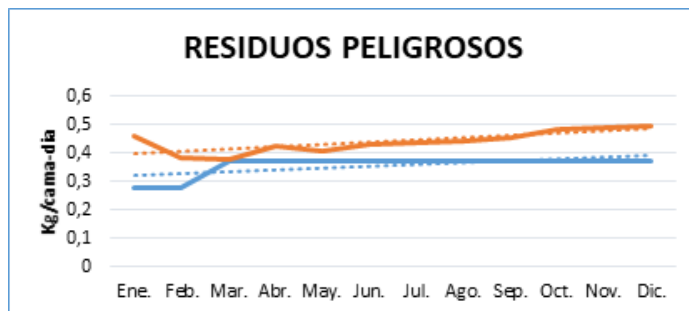


Figura 2. Índice generación de residuos peligrosos año 2015

- Generación de residuo ordinario año 2015.* A pesar de las modificaciones de la meta para el índice de generación de residuo ordinario de 0.67 a 0.9 Kg/cama día, no ha sido posible lograr el cumplimiento de esta meta (Figura 3). Para lograr una disminución de este índice se está mencionando en todas las capacitaciones o charlas de sensibilización del programa hospital sostenible, recomendaciones que le apuntan a la disminución de los residuos sólidos ordinarios, además de concursos donde se fomenta el reciclaje.

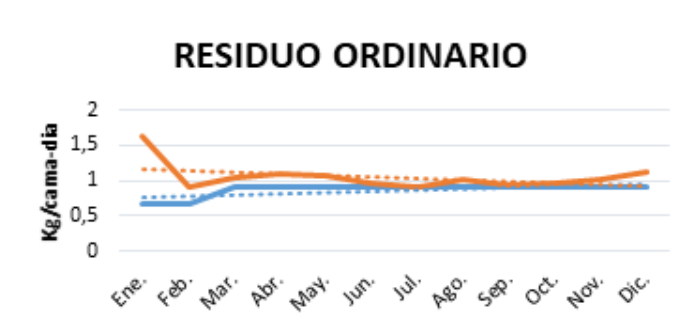


Figura 3. Índice generación de residuos ordinarios año 2015

- Generación de residuo reciclable año 2015.* La tendencia a la baja en el índice de generación de residuos reciclables se observa debido a los cambios en los procesos de segregación donde fueron extraídos materiales considerados reciclables lo que disminuyó casi en 4000 Kg (Figura 4) el reciclaje total generado en el mes por la institución, esta situación ya ha sido evaluada con la elaboración de planes de acción y estrategias como el concurso el Reciclon.

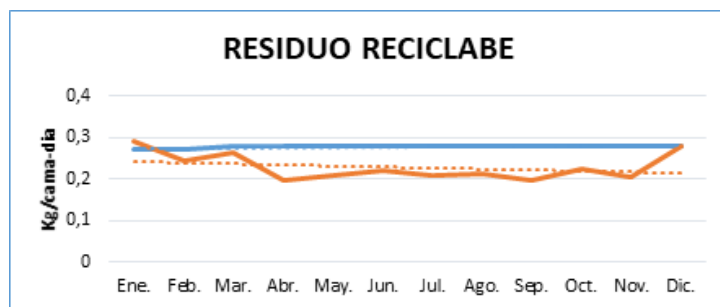


Figura 4. Índice generación de residuos reciclables año 2015

- Índice de consumo de agua año 2015.* El índice de consumo de agua (Figura 5) para los meses del segundo semestre de 2015 muestra una tendencia a la disminución en los meses en los cuales se realizó la socialización de los indicadores visuales instalados en las baterías sanitarias de la institución, además se empleó el seguimiento de las oportunidades, en las cuales el centro de cáncer solicitaba dejar el agua a pérdida para el funcionamiento del acelerador lineal.

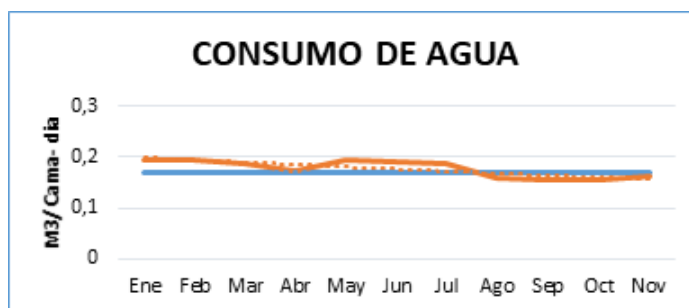


Figura 5. Índice de consumo de agua año 2015

- *Índice de consumo de energía año 2015.* El índice de consumo de energía (Figura 6) muestra una inestabilidad debido las diversas actividades de obra, incremento en los otarios de atención del servicio a radioterapia y algunos otros servicios ambulatorios las demás sedes presentan un cumplimiento de la meta.

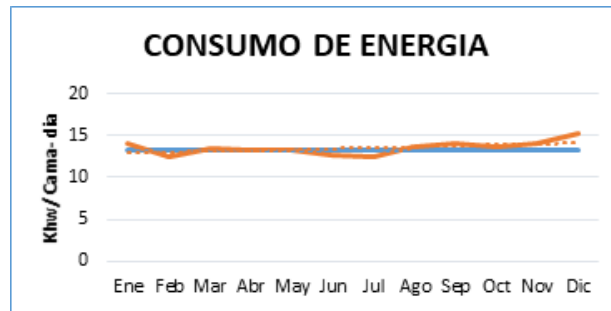


Figura 6. Índice de consumo de energía año 2015

## 5.2 Indicadores de gestión ambiental año 2016 institución objeto de estudio

- *Generación de residuo peligroso año 2016.* A pesar del cambio de la Meta en el año 2015 debido a las nuevas normas para la segregación de residuos aún se evidencia incumplimiento en las metas del índice de generación de residuos peligrosos (Figura 7), se hace necesario revisar transformaciones propias en el servicio asistencial, tales como normas para los diferentes tipos de aislamientos de pacientes, incremento de prestación del servicio de hemodiálisis intramural e incremento de servicios de trasplante.

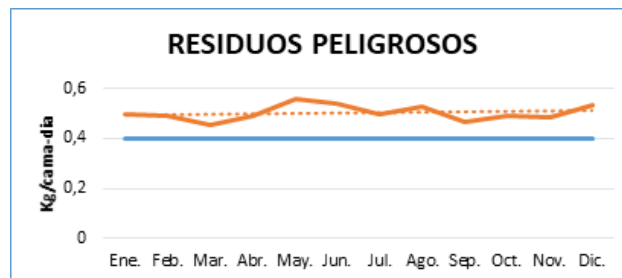


Figura 7. Índice de generación de residuos peligrosos año 2016

- *Generación de residuo ordinario año 2016.* Para el año 2016, se ve un comportamiento positivo en el índice de generación de residuos ordinarios (Figura 8), debido al gran despliegue de campañas, la socialización de resultados de medición de adherencia y los cambios en el etiquetado y ubicación de las papeleras para la segregación de los residuos.

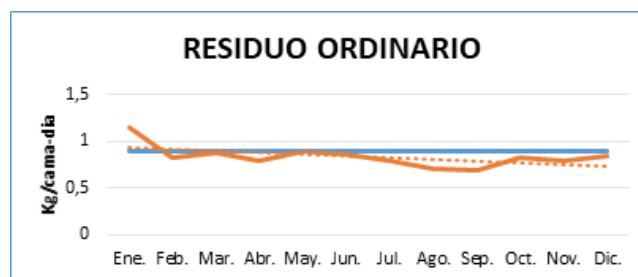


Figura 8. Índice de generación de residuos ordinarios año 2016

- *Generación de residuo reciclable año 2016.* A pesar de que se continua con el concurso el Reciclon para el año 2016 se evidencia incumplimiento del índice de generación de residuos Reciclables (Figura 9), se evidencian desperdicios de material PET (Botellas de Agua), en las áreas asistenciales, motivo por el cual se realiza el despliegue de sensibilización con indicadores visuales en las papeleras blancas de los pasillos de las áreas de hospitalización y la recomendación a los servicios de aseo y alimentos para que socialicen el uso de las papeleras blancas para la disposición de las botellas de agua que se entregan en las habitaciones.

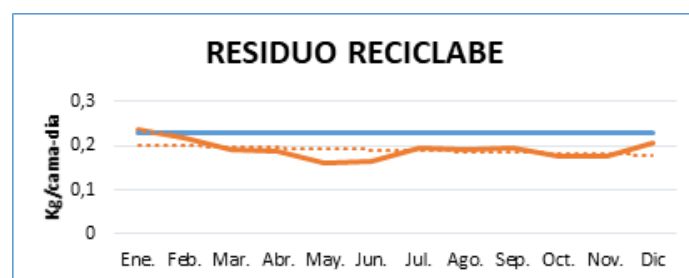


Figura 9. Índice de generación de residuos reciclables año 2016

- **Índice de consumo de agua año 2016.** El indicador de consumo de agua (Figura 10) cuenta con un cumplimiento de sus metas, salvo en los meses de octubre y noviembre donde se evidenció un daño en el sistema de refrigeración del equipo de Radio Terapia del Centro de Cáncer, lo cual generó la necesidad de operar el simulador con la condición de agua a pérdida, condiciones las cuales afectan el comportamiento del índice de consumo de agua, pero que para el mes de diciembre ya muestra un mejoramiento en su comportamiento.



Figura 10. Índice de consumo de agua año 2016

- **Índice de consumo de energía año 2016.** Para el Indicador del consumo de energía (Figura 11), se evidencia un comportamiento regular en el cumplimiento del indicador el cual se ha considerado mantener con las estrategias manejadas con el apoyo del departamento de ambiente físico, para el apagado de luces en la madrugada de las zonas de la institución que cuentan con iluminación natural, además de las campañas que se tienen para la sensibilización de usuarios y trabajadores.

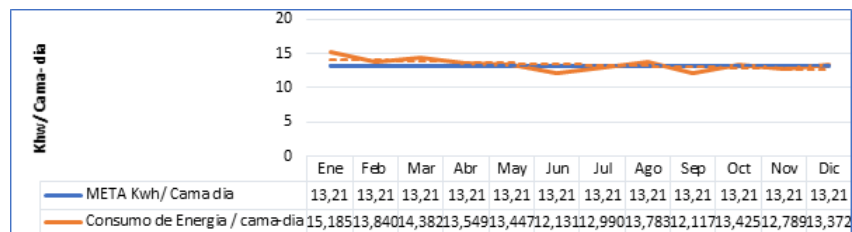


Figura 11. Índice de consumo de energía año 2016

### 5.3 Indicadores de gestión ambiental año 2017 institución objeto de estudio

- **Generación de residuo peligroso año 2017.** En el proceso de revisión de los indicadores de gestión ambiental se define el uso de metodología de Semaforización de los indicadores de gestión ambiental con niveles de cumplimiento clasificados como: Excelente, Bueno, Por Mejorar y Critico donde el comportamiento a partir de Julio 2017 fecha en la cual se realizó la actualización de la meta se evidencia un cumplimiento a satisfacción (Figura 12). Se inicia una etapa de mejoramiento en el cumplimiento de metas del indicador de Índice de generación de residuos peligrosos.

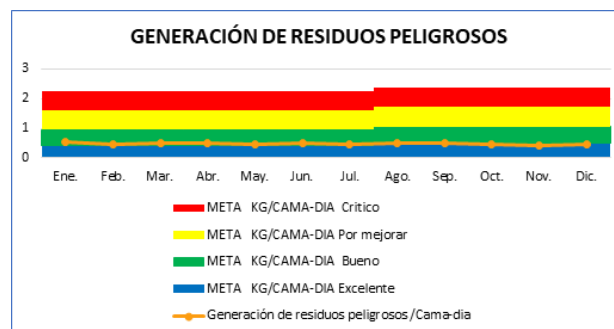


Figura 12. Índice de Generación de Residuos Peligrosos Año 2017

- **Generación de residuo ordinario año 2017.** Con el mejoramiento en la metodología de Cálculo, Análisis y Toma de decisiones con respecto a los resultados obtenidos en los indicadores de gestión ambiental, se refleja un comportamiento satisfactorio del índice de generación de residuos ordinarios (Figura 13).

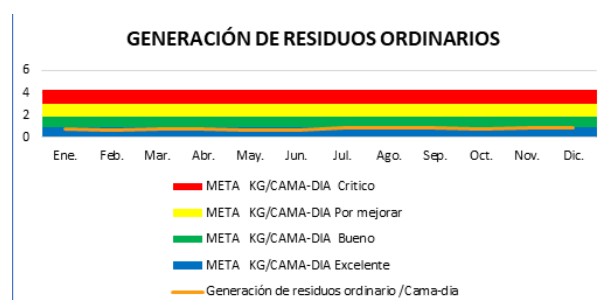


Figura 13. Índice de generación de residuos ordinarios año 2017

- *Generación de residuo reciclable año 2017.* Aunque con mayor Dificultad y apoyado del concurso el Reciclon y demás actividades realizadas por la Unidad de Gestión Ambiental de la institución objeto de estudio se evidencia un cumplimiento de la meta en los 3 últimos meses del año 2017 (Figura 14) y que gracias a la metodología de semaforización se evidencia también que los demás meses presentan un comportamiento Bueno respecto a los límites establecidos.

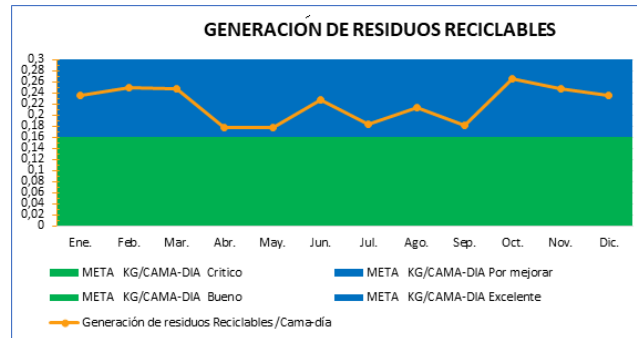


Figura 14. Índice de generación de residuos reciclables año 2017

- *Índice de consumo de agua año 2017.* Para el Índice de Consumo de Agua (Figura 15) se evidencia un pequeño incremento comportamiento del Indicador debido a un daño en el Sistema de Refrigeración de una de las torres de hospitalización de la institución prestadora de servicios de salud objeto de estudio para este indicador se refleja un nivel de desempeño bueno según la Metodología de Semaforización.

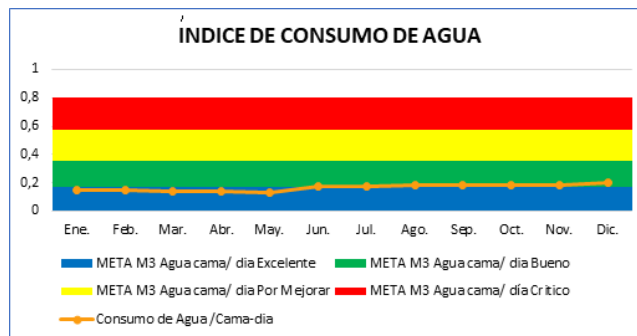


Figura 15. Índice de consumo de agua año 2017

- *Índice de consumo de energía año 2017.* El indicador de Consumo de Energía (Figura 16) presenta un cumplimiento de las Metas en todo el transcurso del año y un comportamiento excelente en el segundo semestre del año 2017, Evidenciándose satisfactoriamente el mejoramiento del comportamiento de Índice de Consumo de Energía.

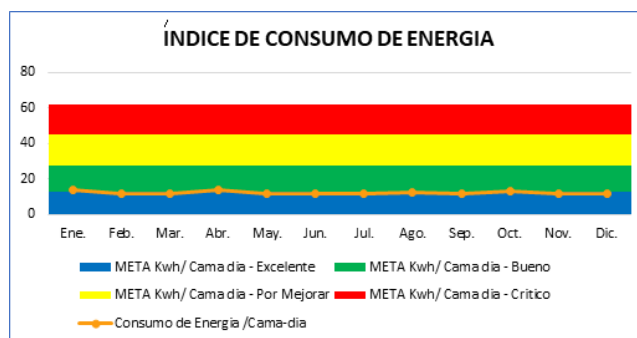


Figura 16. Índice de consumo de energía año 2017

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras la consolidación de las actividades de implementación del Referencial para la Metodología Evaluación del Desempeño Ambiental Sector Salud en Colombia "Norma ISO 14031". Se inició un monitoreo de resultados en el segundo semestre del año 2017, una vez aprobada la modificación de las fichas técnicas de los indicadores de gestión ambiental actualizadas para el año 2017 donde se utiliza la metodología de semaforización para clasificar los resultados en cuatro diferentes categorías de cumplimiento (Excelente, Bueno, Por Mejorar, Crítico). Se evidencian un comportamiento similar en los 5 indicadores de gestión cuyos resultados fluctúan en las categorías de excelente y bueno. Para el único indicador que mostro un comportamiento desfavorable que es la razón de consumo de Agua, según el análisis se identificó un daño del sistema de refrigeración de una de las torres de hospitalización de la institución prestadora de servicios de salud objeto de estudio lo que genero la pérdida constante de agua, para lo cual la institución realizo una inversión en renovación tecnológica gestionando la compra de un nuevo Chiller y Torre de enfriamiento para esta torre con lo cual se espera que este nuevo equipo optimice el consumo de Agua y de Energía.

Para los indicadores de Razón de Generación de residuos (Peligrosos, Ordinarios, Reciclables) se reconoce un cumplimiento satisfactorio, lo cual genera un importante ahorro en el costo por disposición final de residuos peligrosos.

## **7. CONCLUSIONES**

Dentro del Diagnóstico Inicial realizado en la Clínica Objeto de Estudio del Departamento de Santander se identificaron grandes debilidades en los Estándares de Cumplimiento de la Norma ISO 14031 Estándar 6 ¿La evaluación del Desempeño Ambiental de la Organización es Planificada de Acuerdo a sus Objetivos de Desempeño Ambiental? Y el Estándar 7 ¿Existe una Metodología para la planificación de la EDA? Donde sus niveles de cumplimiento fueron de 40% y 24% respectivamente, para lo cual se concluyó de gran relevancia la implementación de una Metodología para el Mejoramiento de la Evaluación del Desempeño Ambiental de la Institución.

Para la validación del Referencial para la Metodología Evaluación del Desempeño Ambiental Norma ISO 14031 Versión 2016, se seleccionaron dos expertos técnicos en Gestión Ambiental y Calidad en Salud, a fin de identificar atributos para la aplicabilidad de la Guía en Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud en Colombia, quienes aprobaron generaron recomendaciones especificar en el documento y aprobaron dentro de sus criterios la publicación del documento.

Para la validación de la Metodología de sistemas de control de Gestión Ambiental se realizó la Implementación del “Referencial para la Metodología Evaluación del Desempeño Ambiental Norma ISO 14031” teniendo en cuenta los criterios evaluados en la fase de Diagnostico, partiendo de un Análisis de Contexto y de las Necesidades y Expectativas de las partes interesadas, generando un mejoramiento del programa de gestión ambiental [10], evidenciado en los resultados monitoreados en el segundo semestre del año 2017, cuyos indicadores priorizados en la fase de implementación generaron niveles de cumplimiento según la metodología de semaforización adoptada por la Institución.



## REFERENCIAS

- [1] Quiroga, R. (2001). Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas. Manual serie CEPAL - División de medio ambiente y asentamientos humanos.
- [2] Aguirre, M. (2002). Los Sistemas de Indicadores Ambientales y su Papel en la Información e Integración Del Medio Ambiente. En I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente 2001, 1231-1256.
- [3] Ministerio de la Protección Social (2011). Manual de acreditación en salud, ambulatorio y hospitalario. Colombia.
- [4] Ministerio de la Protección Social (2006). Decreto 1011: Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad de la Atención de Salud del Sistema General de Seguridad Social en Salud. Colombia.
- [5] Quiroga, R. (2009). Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe. Manual serie CEPAL - División de medio ambiente y asentamientos humanos.
- [6] Ministerio de salud y protección social (2014). Resolución 2082: Operatividad del sistema único de acreditación en salud. Colombia.
- [7] Granero, J. et al. (2007). Cómo implantar un sistema de gestión ambiental según la norma ISO 14001: 2004. FC Editorial.
- [8] Atehortua, F. (2005). Gestión y auditoría de la calidad para organizaciones públicas: normas NTCGP 1000: 2004 conforme a la ley 872 de 2003. Universidad de Antioquia.
- [9] Salgueiro, A. (2001). Indicadores de gestión y cuadro de mando. Ediciones Diaz de Santos.
- [10] Manteiga, L. (2000). Los indicadores ambientales como instrumento para el desarrollo de la política ambiental y su integración en otras políticas. Terracentro para la política ambiental. Instituto de Estadística de Andalucía.
- [11] Varo, J. (1994). Gestión estratégica de la calidad en los servicios sanitarios: un modelo de gestión hospitalaria. Ediciones Díaz de Santos.
- [12] Escobar, L. (2007). Indicadores sintéticos de calidad ambiental: Un modelo general para grandes zonas urbanas. *Eure* 32(96), 73-98.
- [13] Cifuentes, C. & Iglesias, S. (2008). Environmental management of solid wastes in Cayetano Heredia Hospital. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica* 12(23), 27-39.

# Herramientas de ingeniería aplicadas en el proceso de compostaje y vermicompostaje. Caso de estudio: Universidad Militar Nueva Granada

David F. Cárdenas M.<sup>1</sup>

Camilo A. Quiroga C.<sup>2</sup>

Nataly L. Guarín C.<sup>3</sup>

Universidad Militar Nueva Granada  
Cajicá – Colombia

Dentro de las instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, sede Campus, actualmente se ejecutan procesos para la obtención de abonos orgánicos, con el fin de mitigar impactos negativos al medio ambiente, referidos al compostaje y vermicompostaje. Procesos mediante los cuales, es posible tratar una gran variedad de residuos sólidos orgánicos, obteniendo un producto que sirve como abono, y al cumplir con una serie de parámetros establecidos por la NTC 5167 del año 2004, puede caracterizarse como un producto comercializable. Teniendo en cuenta lo anterior y buscando el mejoramiento continuo, se evidenció la ausencia de la caracterización de dichos procesos y por lo tanto, la falta de aplicación de técnicas estadísticas que permitan su análisis, razón por la cual se aplicaron algunas herramientas ingenieriles como lo son los diagramas de flujo, diagrama de Pareto, diagrama de Ishikawa e Histograma, que permitan generar una personalización y un valor agregado a los procesos, identificando algunos problemas frecuentes. Concluyendo, se obtuvo una visión más detallada de estos procesos, identificando posibles fallas y proponiendo soluciones basadas en el conocimiento adquirido en la formación como Ingenieros Industriales.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un incremento de producción trae consigo la generación de una gran cantidad de residuos sólidos, lo que presenta un gran problema para el medio ambiente, ya que se están vertiendo en aguas dejándose descomponer, generando contaminación y gases de efecto invernadero. Por lo anterior, es necesario adoptar metodologías que sean amigables con el medio ambiente y se dé un valor agregado a estos residuos, para que consecutivamente, sean constituyan la materia prima para una transformación posterior. Dentro de los nuevos conceptos del manejo de desechos sólidos, entendiéndose este como un sistema que incluye la limpieza, recolección, transporte, disposición final y aprovechamiento de los residuos de una comunidad en un territorio determinado, se encuentran las prácticas de compostaje y vermicompostaje que parte de una concepción sistémica puntualizada en procesos de recuperación y aprovechamiento, ambos actualmente, aplicados en la Universidad Militar Nueva Granada, sede Campus.

El interés principal de la realización de este artículo, es dar solución a la evidencia de la falta de caracterización en los procesos de compostaje y vermicompostaje que se manejan en las instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, lo que genera un reconocimiento inadecuado de éstos, que hace imposible su estudio, análisis y optimización, ya que, pueden existir bastantes oportunidades de mejora que no se han considerado. Por lo anterior, es importante hacer uso de técnicas ingenieriles para caracterizarlos y poder de esta manera verificar parámetros de calidad a seguir y obtener un resultado o producto final que cumpla con las condiciones exigidas por los usuarios.

## 2. MARCO TEÓRICO

Con el fin de poder realizar este artículo, fue necesario tener un conocimiento previo y hacer investigaciones profundizando en temas como los residuos sólidos orgánicos, compostaje, vermicompostaje, ingeniería de métodos e ingeniería de calidad, siendo estos los ejes principales de las herramientas ingenieriles y técnicas que se aplicaron para el mejoramiento y caracterización del proceso. Es importante tener claro que los residuos orgánicos son aquellos caracterizados como biodegradables, es decir, que los microorganismos descomponedores de la naturaleza los transforman en micronutrientes. Algunos ejemplos son: las cascaras de frutas, restos de comida, pelaza de vegetales, papel, cartón, hojas secas, césped cortado, entre otros [1].

Los residuos orgánicos tienen un fuerte impacto sobre el medio ambiente, contaminando la atmósfera, el suelo y las aguas, debido principalmente a sus altos contenidos en materia orgánica -inestable e inmadura- y elementos minerales. De entre las diferentes alternativas de gestión de los residuos orgánicos se encuentran, tanto el depósito en vertederos como la incineración, provocan la emisión de CO<sub>2</sub> y de otros gases a la atmósfera, contribuyendo al efecto invernadero. Además, otras alternativas para la gestión de los residuos sólidos orgánicos son el compostaje y el vermicompostaje, ya que, mediante su utilización es posible tratar una gran variedad de residuos, disminuyendo así las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases que emergen si no se aplica ningún tratamiento durante su descomposición.

### 2.1 Vermicompostaje

El vermicompostaje es un proceso que utiliza a una especie domesticada de lombriz, la *Eisenia fétida*, como herramienta de trabajo. Esta especie es hermafrodita, copula entre 1 y 5 veces por semana, produciendo una puesta

---

<sup>1</sup> u5800116@unimilitar.edu.co

<sup>2</sup> u5800121@unimilitar.edu.co

<sup>3</sup> nataly.guarin@unimilitar.edu.co

o cocón que contiene de 2 a 4 embriones (máximo: 9) [2]. Además, es capaz de consumir diariamente alimento equivalente a su propio peso. Este proceso permite transformar un residuo en un recurso, es una forma efectiva para convertir rápidamente los desechos orgánicos, en un material rico en nutrientes, que al igual que un abono o el compost, proporciona beneficios al suelo, mejorando su estructuración, aireación e incrementando su actividad biológica. Este producto obtenido o recurso es denominado Humus.

En el Campus Nueva Granada, existe la Unidad de Manejo de Residuos Sólidos Orgánicos, la cual cuenta con áreas para tratar y procesar por medio de la técnica del vermicompostaje, una cantidad de 60 kg/día de biosólidos resultantes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, algunas veces mezcladas con algas que se generan en los reservorios de agua. Otro tipo de residuos utilizados en este proceso, son los procedentes de la pre-cocción de alimentos en el área de restaurante, zonas de comidas de las cinco cafeterías y podas de zonas verdes provenientes del mantenimiento del Campus. Todos los residuos llegan inicialmente a una serie de filtros con el objetivo de clasificarlos en los orgánicos, que se llevan a ser tratados. La Unidad está ubicada en un invernadero que se diseñó y construyó con un área de 60 m<sup>2</sup> (10 m x 6 m) y un declive del 0,5% con el fin evacuar las aguas pluviales en caso de filtrarse y los posibles lixiviados que se generen.

Se realiza el tratamiento de los biosólidos en un sistema que cuenta con 5 camas o pilas de 2,0 m x 1,0 m x 0,4 m en ausencia de luz, su temperatura debe oscilar entre 10 °C y 30°C [3], siendo la óptima de 20°C [4]. Se realiza un control de humedad que se pretende estandarizar entre el 40% y el 60%, siendo la óptima del 60% [4]. El procedimiento debe mantener un pH en el rango de 5,0 a 8,5 [4]. Es importante recordar también, que la humedad de 60% controla las plagas, hormigas, que se acercan por los azúcares que produce la lombriz al deslizarse por el sustrato [5].

Por cada kilogramo de biosólido utilizado como sustrato se inoculan alrededor de 400 individuos de lombrices adultas, las cuales tardan cerca de 90 días en transformar el sustrato en humus o abono. El humus con lombrices es esparcido sobre una poli-sombra dispuesta sobre la nueva cama, la cual permite que estas pasen reteniendo el sustrato; en este punto se toma una muestra que se evalúa en un laboratorio como punto de control para la calidad del producto obtenido.

Es vital incluir materia rica en Nitrógeno y Carbono. Los materiales con mayor contenido en nitrógeno se pueden clasificar en 2 tipos: residuos domésticos y vegetación verde. Por su parte, el carbono, se emplea para acondicionar el material haciéndolo más esponjoso y aireado. Una vez finalizado el proceso, quedan finas partículas de fibra que mejoran las cualidades del humus. Éste, se encuentra en cáscaras de cereales, papel y cartón. Una vez extraídas las lombrices, el vermicompostaje o producto resultado del proceso, es dispuesto en la zona de secado, para ser posteriormente triturado y enviado a la zona de empaque.

## **2.2 Compostaje**

El compostaje es un proceso que implica intervención aerobia, no presenta malos olores ni putrefacción, donde los residuos orgánicos biodegradables se descomponen mediante una oxidación bioquímica, bajo condiciones controladas, generando CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, energía calórica y materia orgánica estabilizada, en forma de abono, denominado compost [6]. Genera una transformación de la materia orgánica por acción de microorganismos y descomponedores del suelo, obteniendo como resultado de este proceso un abono orgánico de calidad que proporciona a las tierras a las que se aplica, los mismos efectos beneficiosos que el humus o abono para una tierra natural. La metodología más utilizada para producir compost es en pilas, que son montones de residuos de diferente composición colocadas en capas superpuestas. Algunos ejemplos de residuos que se pueden utilizar son los desperdicios de cocina como cáscaras de frutas y residuos de verduras, césped cortado, hojas y demás restos de jardín.

La Unidad de Manejo de Residuos Sólidos Orgánicos, también cuenta con áreas para tratar y procesar por medio del compostaje una cantidad de 150 kg/día de residuos. El terreno utilizado para esto es un lugar sombreado y protegido de los vientos, con acceso al recurso agua, para regar el montón manteniendo su humedad; siendo un contenido de humedad ideal mayor o igual al 40% y menor al 60%. Si el contenido en humedad es mayor, el agua ocupará todos los poros y por lo tanto el proceso se volvería anaeróbico, es decir se produciría una putrefacción de la materia orgánica [7]. Si la humedad es muy baja se reduce la interacción de los microorganismos haciendo el proceso más lento.

Los parámetros que se deben cumplir para este proceso son tamaño de pilas de 1,5 m de ancho \* 1,5 m de largo, \* 1,80m de altura (o menos), ya que el peso del material puede compactar las capas inferiores. Como precaución a este efecto, se colocan ramas en la base de la pila de compost. Para la disposición de las capas se inicia con una capa de material pajoso de 15cm de espesor, la siguiente capa de un material fresco (rico en nitrógeno) de igual espesor y finalmente una capa de tierra de menor espesor (5cm). Respecto a la temperatura se consideran óptimas las temperaturas del intervalo 35-55°C para conseguir la eliminación de patógenos, parásitos y semillas [7]. En la elaboración del compost resultó favorable el volteo o aireo de las pilas dos veces por semana [8].

## **2.3 Ingeniería de calidad**

La ingeniería de calidad es una disciplina que desde sus orígenes en 1949 desarrolló una metodología integral que tiene como propósito, hacer uso de diferentes prácticas de la ingeniería y estadística, para generar un conjunto de herramientas que permitirán hacer la evaluación, análisis y diseño de los procesos para generar menos costos por defectos y garantizar el cumplimiento de parámetros de evaluación. Está orientada a los resultados, con potestad de

hacer un juicio y generar resultados óptimos para los clientes o usuarios. La aplicación de la ingeniería de calidad debe trabajar en pro del cumplimiento total de las especificaciones, recomendaciones y observaciones para la satisfacción de las necesidades y expectativas del cliente.

La ingeniería de calidad pretende maximizar la eficiencia, mediante una prestación de servicios, sumando valor agregado al producto, orientando los esfuerzos a la identificación de oportunidades, que eventualmente genera un desarrollo empresarial y un mejoramiento continuo.

## **2.4 Diagrama de Ishikawa**

El diagrama de Ishikawa, llamado así por su creador en el año 1943, Kaoru Ishikawa, es un diagrama horizontal que representa un problema en general y se identifican sus causas principales en seis áreas principales, por lo general, Maquinaria, Mano de obra, Materiales, Métodos, Medio ambiente y Medición (6 M's).

Los pasos a seguir para la elaboración del diagrama de Ishikawa son: Identificación del problema o inconveniente a resolver; una vez identificado el problema, se sitúa al lado derecho de la línea principal del diagrama, esta línea principal es trazada de manera horizontal y se puede establecer como una columna vertebral dentro del proceso, de la cual se van a derivar las posibles causas que estén generando el problema a tratar. El paso a seguir después de haber identificado el problema central, es generar las seis principales áreas que tiene usualmente un diagrama de Ishikawa (6 M's) con líneas rectas verticales que salen de la línea general horizontal, a partir de las cuales se podrán derivar las posibles subcausas de las inconformidades dentro de cada área. De las causas encontradas se seleccionan una o más que sean evidentes en el proceso y se sitúan dentro de cada una de las seis áreas principales, saliendo de estas con una flecha que indique específicamente dentro de que área se encuentra cada uno de los inconvenientes.

Es necesario también evidenciar cuales o cual es la causa raíz al problema central a partir de todos los inconvenientes presentados en el diagrama, con el fin tomar acciones correctivas en las posibles causas del problema central [9]. Por su carácter eminentemente visual, es muy útil en las tormentas de ideas realizadas por grupos de trabajo y círculos de calidad [10].

El objetivo de utilizar esta herramienta es identificar causas raíces de percances o inconvenientes presentes en el desarrollo del proceso, clasificarlas en las denominadas 6 M's, generando planes de contingencia para dar solución en lo posible a los problemas o amortiguar las causas ya mencionadas. El uso de la herramienta se justifica en la evaluación, análisis y control de los parámetros de calidad, para asumir a cabalidad todas las fallas identificadas con la herramienta para abordarlas correctamente, generando en lo posible mejoras destacadas. Su desarrollo se encuentra en la Figura 1.

## **2.5 Diagrama de Pareto**

Este diagrama recibe su nombre del economista y sociólogo italiano Wilfredo Pareto, ingeniero del Instituto Politécnico de Turín [11]. El origen de este concepto nace en el siglo XIX cuando se determinó que el 80% de la riqueza de Italia estaba en manos del 20% de la población [12]. El diagrama de Pareto, es un gráfico que mediante barras expresa la frecuencia de varios hechos o problemas que se presentan dentro de un proceso, en este se pueden observar las barras en forma descendiente de izquierda a derecha, según la frecuencia de cada incidente o problema presente dentro del proceso. Mediante el Diagrama de Pareto se pueden detectar los problemas que tienen más relevancia mediante la aplicación del principio de pocos vitales, muchos triviales, que indica que hay muchos problemas sin importancia, frente a sólo unos graves [13].

Se pretende utilizar el diagrama de Pareto en primera instancia para identificar las fallas o problemas recurrentes en la transición del proceso de aplicación de las técnicas, para lo cual es necesario utilizar herramientas estadísticas. Una vez establecida la identificación de las fallas y su correspondiente recurrencia, la herramienta nos permite abordar las problemáticas de manera prioritaria, es decir, tratar las que generan mayores percances en el proceso en cuanto a su recurrencia, resaltando un porcentaje aproximado del 80%, para resolver problemas que en teoría generan mayores consecuencias para el proceso.

Los pasos a seguir para la realización de un diagrama de Pareto son: Identificación de los problemas, quejas, reclamos o inconformidades que se estén presentando dentro de un proceso durante un periodo de tiempo; para obtener tal información, se puede implementar un buzón de sugerencias o encuestas que se realicen a los clientes. Una vez se tengan claras las inconformidades, quejas o reclamos de los clientes es necesario tener una base de datos con el fin de saber con qué frecuencia se presenta cada inconformidad, queja o reclamo. Teniendo la frecuencia con la que se presenta cada inconformidad, queja o reclamo, se procede a introducir estos datos dentro de una tabla en la cual se pueda observar claramente el nombre del problema y su frecuencia. Contando con la información de los problemas dentro de la tabla, es necesario ordenar las inconformidades, quejas o reclamos de mayor frecuencia a menor frecuencia en modo descendiente, de manera tal que la inconformidad queja o reclamo con mayor número de incidencia sea la que quede en primer lugar y así sucesivamente hasta llegar a la inconformidad, queja o reclamo que tenga el menor número de incidencia. Después de tener ordenada la tabla de mayor frecuencia a menor frecuencia en cuanto a cada problema, es necesario abreviar cada queja, reclamo o inconformidad, asignándoles por lo general una letra, con el fin de que a la hora de generar el gráfico sea muchos más fácil identificar cada uno de los problemas. Se crean otras dos columnas correspondientes a frecuencia relativa y frecuencia absoluta, información que permite realizar el gráfico.

Para el análisis del gráfico se tiene que evidenciar cuál o cuáles de los problemas se encuentran dentro del rango de la frecuencia absoluta del 0% al 80% en el gráfico, ya que, a estos problemas son a los que se les va a dar la mayor importancia y solución más rápida.

## **2.6 Histograma**

Un histograma es la representación gráfica mediante un muestreo realizado, con el fin de presentar la frecuencia y rango, para observar las posibles variaciones que se estén presentando dentro de un sistema y así poder tomar medidas al respecto. El histograma será la herramienta estadística que será utilizada para evaluar y hacer análisis de las condiciones de calidad de los abonos obtenidos como el peso. El uso de esta herramienta es esencial, ya que permite dimensionar desviaciones y varianzas entre un resultado y otro, lo ideal naturalmente es que los resultados en esta herramienta sean lo más homogéneos posible, para así realizar conclusiones sobre el desempeño del método y de la mano de obra.

El primer paso para elaborar un histograma, es seleccionar una operación en la cual se estén presentando variaciones; para este caso se seleccionó la operación en la cual se empacan los bultos de compostaje y vermicompostaje, ya que existe variación en el peso de cada producto empacado y es necesario saber las dimensiones de esta variación.

El siguiente paso es generar una toma de datos de la variación puesta en estudio y una vez se tenga una muestra que sea mayor a 28 datos, es posible hacer una agrupación de estos. Tal agrupación se hace teniendo como base el dato considerado como óptimo (que en este caso es el peso del producto), generándose intervalos inferiores y mayores al dato base. Para la generación de los intervalos es clave hallar el número de clases y establecer el rango. Es posible introducir los datos en una tabla, con el fin de tener mucho más claro cuál es la incidencia de los datos en cada uno de los intervalos, los intervalos irán de menor a mayor en forma descendiente dentro de la tabla y en frente de ellos la frecuencia con la que los datos inciden en que cada intervalo. Cuando ya se tengan definidos los intervalos y el número de datos dentro de cada intervalo, es posible generar el histograma, este se organiza así: en la parte lateral izquierda tiene la frecuencia con la que se presentan los datos y en la parte inferior los rangos definidos; los datos de la muestra tomada se grafican por lo general en barras. Posteriormente, se realiza un análisis cualitativo.

## **2.7 Ingeniería de métodos**

La ingeniería de métodos es una disciplina que tiene como fin generar estándares y diseño parametrizado del trabajo con el objetivo de reducir costos, incrementar la productividad y siempre teniendo en cuenta al trabajador en lo que respecta a su seguridad y salud. En ocasiones los métodos elegidos para llevar a cabo las actividades que componen un proceso, se diseñan de forma empírica o a través de costumbres, pero no necesariamente significa que sean los adecuados u óptimos.

La ingeniería de métodos parte de herramientas que permiten el rediseño del trabajo y es la disciplina a la que se debe acceder cuando hay tiempos muy largos de operación y se desea maximizar la producción. En teoría es el conglomerado que permite rediseñar y mejorar estándares de trabajo, y, por ende, generar resultados como disminución de tiempos y costos, aumentar confiabilidad de bienes y servicios siempre velando por la conservación del medio ambiente. Todo lo anteriormente mencionado se puede sintetizar en los siguientes objetivos: reducir el costo unitario, para producir más bienes y servicios de calidad, maximizar la seguridad, salud y bienestar de todos los empleados [14], conservar recursos y minimizar costos especificando los materiales directos e indirectos más adecuados para la producción de bienes y servicios y producir con una preocupación creciente por la conservación del medio ambiente [15].

## **2.8 Diagramas de flujo**

Un Diagrama de flujo es la representación gráfica de un proceso o actividad completamente estandarizada [16]. Hace uso de distintas herramientas y símbolos para comprender las etapas y condiciones que tiene un proceso. La representación de un sistema o un proceso deberá quedar resumido en pocas hojas, de preferencia en una sola. Los diagramas extensivos dificultan su comprensión y asimilación, por tanto, dejan de ser prácticos. La aplicación de la simbología adecuada a los diagramas de sistemas y procedimientos evita a los analistas anotaciones excesivas, repetitivas y confusas en su interpretación [17,18].

## **3. MÉTODO**

Dentro de las instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, se tratan una gran variedad de residuos sólidos orgánicos mediante procesos de compostaje y vermicompostaje. Con el fin de caracterizar estos procesos y detectar posibles fallas dentro de cada uno de ellos, se abarcaron varias herramientas ingenieriles, utilizando las siguientes metodologías para cada una de las herramientas.

Con el fin de realizar una caracterización de los procesos de compostaje y vermicompostaje, fue necesario realizar sus respectivos diagramas de flujo, los cuales describen en una forma sencilla y ordenada cada proceso. Una vez se tenga lista la descripción del proceso se hace posible dividir el proceso en actividades de almacenamiento, transporte, demora, operación e inspección con su respectivo tiempo o distancia de recorrido. Posteriormente, se aplican todos los diagramas y técnicas descritos en el marco teórico y se analizan los resultados.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Diagrama de Flujo Vermicompostaje

El proceso del vermicompostaje se inicia con el transporte de la materia prima, hasta el invernadero donde se encuentran las camas de las lombrices, una vez ya se tiene la materia prima en el invernadero se inicia con la adecuación y alistamiento o limpieza de las camas, luego de que estas ya estén limpias, comienza el proceso de armado de las camas poniendo sobre estas capas de hojas secas, césped cortado, lodos, cartón y los residuos sólidos orgánicos, después las camas son humedecidas hasta obtener un 40% de humedad, luego las lombrices son introducidas en las camas para que comiencen con el tratamiento de los residuos, es necesario controlar factores como humedad temperatura y acidez cada 15 días, el proceso de tratamiento total de los residuos dura alrededor de 3 meses, luego de este lapso de tiempo se pone sobre la cama una poli sombra y sobre esta residuos orgánicos con el fin de las lombrices haciendan y se separen del abono ya tratado, a continuación se toma una muestra del abono obtenido y se envía a los laboratorios para su análisis, el resto del abono es llevado hasta el área de secado donde espera durante alrededor de 15, para luego ser triturado y llevado al área de empaque, una vez el abono está empacado, este es almacenado hasta su entrega. Este se refleja en la Figura 1.

Diagrama 1							
Producto	vermi compost				Hoja 1 de 1		
Operario	Pedro Jimenez						
Compuesto por	Javier Ramirez		Fecha				
Aprobado por	Fernando Duque		Fecha				
<b>DIAGRAMA DE FLUJO</b>							
ACTIVIDAD	Simbolo						
Operación	●						
inspeccion	■						
Espera	⏸						
Transporte	➡						
Almacenamiento	▼						
Distancia (mts)		21					
tiempo(min)		156355					
Descripcion	cantidad	distancia(m)	tiempo(min)	Actividad			Observaciones
almacenamiento de los residuos				●			
transporte hasta el invernadero		8			➡		
Adecuacion de las camas			10			■	
Armar camas			30			●	
humedecer camas			10			■	
Introducir lombrices			5			●	
controlar temperatura, humedad y acides cada 15 dias.			10			⏸	
Se espera hasta que las lombrices traten los residuos.			129600			⏸	
trampeo			4320			■	
Analisis			720			●	
Área de secado		4				▼	
Dejar secar			21600			⏸	
Área triturado		3				▼	
Se tritura			30			●	
Área de empaque		2				▼	
Se empaca			20			●	
Almacen		4				▼	
Se almacena hasta su entrega						●	

Figura 1. Diagrama de flujo del vermicompostaje

### 4.2 Diagrama de Flujo Compostaje

El proceso del compost se inicia con el transporte de la materia prima, hasta el invernadero donde se encuentran las pilas, una vez ya se tiene la materia prima en el invernadero se inicia con la adecuación y alistamiento o limpieza de las pilas, luego de que estas ya estén limpias, comienza el proceso de armado de las pilas poniendo sobre estas capas de hojas secas, césped cortado, cartón y los residuos sólidos orgánicos, después las camas son humedecidas hasta obtener un 40% de humedad, es necesario controlar factores como humedad temperatura y acides cada 15 días, cada mes es necesario darle la vuelta a la pila con el fin obtener un producto más homogéneo, el proceso de tratamiento total de los residuos dura alrededor de 3 meses, luego de este lapso de tiempo se toma una muestra del abono obtenido y se envía a los laboratorios para su análisis, el resto del compost es llevado hasta el área de secado donde espera durante alrededor de 15, para luego ser triturado y llevado al área de empaque, una vez el abono esta empacado este es almacenado hasta su entrega. Este se refleja en la Figura 2.

Diagrama 2					
Producto	Compost		Hoja 1 de 1		
Operario	Pedro Jimenez				
Compuesto por	Javier Ramirez	Fecha			
Aprobado por	Fernando Duque	Fecha			
<b>DIAGRAMA DE FLUJO</b>					
ACTIVIDAD	Simbolo				
Operación	●				
inspeccion	■				
Espera	D				
Transporte	➔				
Almacenamiento	▼				
Distancia (mts)		22			
tiempo(min)		144830			
Descripcion	cantidad	distancia(m)	tiempo(min)	Actividad	Observaciones
Almacenamiento de los residuos					
transporte hasta el invernadero		8			
adecuacion de la pila			20		
Hacer montaña			30		
Humedecer pila			10		
Controlar la humedad y temperatura			10		
Dejar reposar el compost			129600		
analisis			720		
Area de secado		5			
secado			14400		
Area triturado		4			
Se tritura el compost			30		
Area de empaque		2			
Se empaca			10		
Almacen		3			
Se almacena hasta su entrega					

Figura 2. Diagrama de flujo del compostaje

### 4.3 Diagrama de causa-efecto

Es una herramienta que representa la relación entre un efecto (problema) y todas las posibles causas que lo ocasionan. Es denominado Diagrama de Ishikawa o Diagrama de Espina de Pescado por ser parecido con el esqueleto de un pescado. En el proceso de compostaje y vermicompostaje llevado a cabo dentro de las instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, se ha podido identificar la problemática en la que los clientes no están satisfechos, porque la entrega de pedidos de los abonos tarda demasiado, a continuación, se analizan las posibles causas de esta demora por medio de un diagrama de causa-efecto, como se observa en la Figura 3.

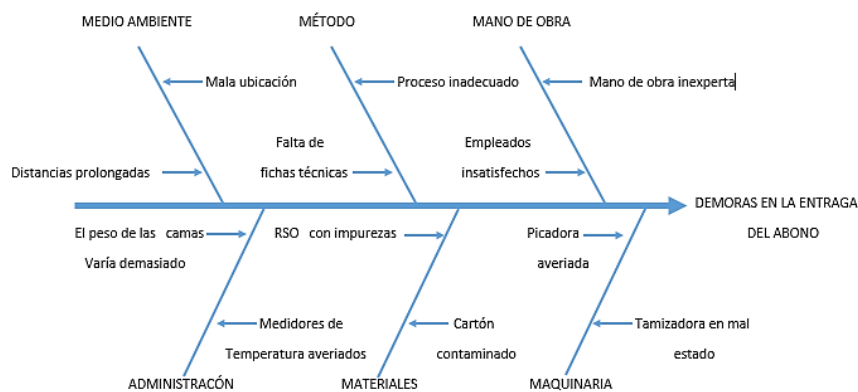


Figura 3. Diagrama de Ishikawa

### 4.4 Gráfico de Pareto

En el proceso de compost y vermicompostaje que se lleva a cabo dentro de las instalaciones de la UMNG sede campus, se realizó un estudio sobre los problemas que se presentaron durante el periodo del mes de noviembre del 2017 en cuanto a su proceso irregulares, satisfacción y reclamo que presentaron nuestros clientes, las problemáticas encontradas fueron las siguientes, las cuales se analizaron y obtuvieron resultados por medio del diagrama de Pareto. Los datos se reflejan en las Tablas 1 a 3 y el diagrama en la Figura 4.

**Tabla 1.** Problemas encontrados en el último mes

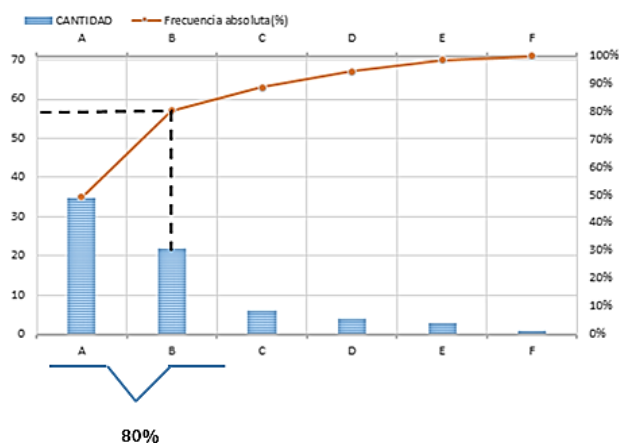
Problema	Reclamos	Causa
El precio del producto es muy elevado	1	F
El vendedor es descortés	35	A
El producto contiene impurezas	3	E
El tipo de empaque no es el solicitado	22	B
El tipo de abono no es el solicitado	4	D
El peso del producto no es el adecuado	6	C

**Tabla 2.** Datos para le generación del diagrama de Pareto

Problema	Reclamos	Causa
El vendedor es descortés	35	A
El tipo de empaque no es el solicitado	22	B
El peso del producto no es el adecuado	6	C
El tipo de abono no es el solicitado	4	D
El producto contiene impurezas	3	E
El precio del producto es muy elevado	1	F

**Tabla 3.** Problemas encontrados para el gráfico de Pareto ordenados de mayor a menor

Causa	Cantidad	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta
A	35	49%	49%
B	22	31%	80%
C	6	8%	89%
D	4	6%	94%
E	3	4%	99%
F	1	1%	100%
	71	100%	

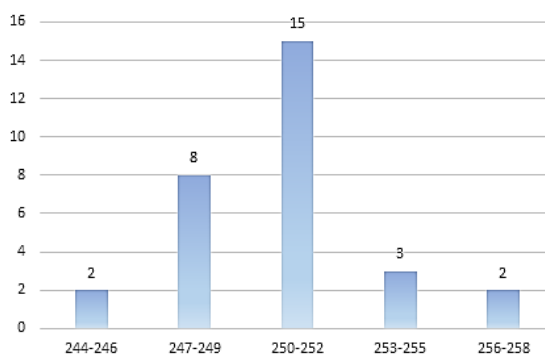


**Figura 4.** Gráfico de Pareto

Como se puede observar en el grafico el 80% de las quejas, reclamos y no conformidades se encuentran en las causas A y B, por lo tanto, es de vital importancia resolver los problemas encontrados en el vendedor es descortés y el tipo de empaque no es el solicitado, ya que son las áreas en las cuales se encuentra el mayor número de no conformidades de nuestros clientes.

#### 4.5 Histograma

Durante un estudio de toma de pesos realizado a los productos terminados en el proceso de compostaje y vermicompostaje dentro de la universidad militar nueva granada, se pudieron obtener siguientes datos reflejados en las Tablas 4 a 6 y el diagrama se observa en la Figura 5.



**Figura 5.** Histograma



**Tabla 4.** Muestreo del Histograma

<b>Abono Empacado</b>	
<b>Dato</b>	<b>Peso(gr)</b>
1	251
2	254
3	250
4	248
5	252
6	244
7	251
8	248
9	248
10	253
11	251
12	256
13	252
14	251
15	248
16	249
17	251
18	245
19	253
20	248
21	251
22	257
23	250
24	251
25	249
26	250
27	252
28	249
29	252
30	250

**Tabla 5.** Variables para la agrupación de los datos del Histograma

Numero de clases	5
Rango	13
Ancho de intervalo	2

**Tabla 6.** Datos del Histograma agrupados

<b>Peso (gr)</b>	<b>Incidencias</b>
244-246	2
247-249	8
250-252	15
253-255	3
256-258	2
Total	30

Como se puede observar en la figura 5, 15 de 30 muestras tomadas se encuentran entre 250gr y 252gr lo cual equivale a un 50% del número de datos tomados en esta muestra y 8 de 30 muestras tomadas se encuentran entre 247gr y 249gr lo cual equivale a un 13,33% del número de datos tomados en esta muestra. Cada bulto de abono debe pesar aproximadamente 250gr, la tolerancia aceptada para el peso de cada bulto es de más o menos 5gr y como se puede observar en el histograma el 86,66% de las muestras están en el rango de tolerancia de entre 245gr y 255gr, aunque el porcentaje de datos que se encuentra en el rango de tolerancia es elevado, es necesario plantearse soluciones para mejorar de dicho porcentaje, ya que hay un 13,33% de oportunidades de mejoras en el mismo.

## 5. CONCLUSIONES

El abono orgánico obtenido en las pruebas y experimentos realizados de forma estándar es de calidad suficiente según los parámetros comunes sugeridos por normas que rigen la calidad a nivel nacional. El análisis de estas características indica que es un producto adecuado para la comercialización.

La caracterización del proceso con el uso de herramientas de la ingeniería industrial garantizando calidad y uso, permite incentivar la aplicación y búsqueda de estas y nuevas metodologías sostenibles.

El estándar del proceso permite generar una gran cantidad de parámetros para analizar con las que se pueden generar planes de trabajo o un estado de comercialización neto.

Las herramientas de calidad permitieron estabilizar el proceso y garantizar su uso, de la forma estándar en la que se determinó, teniendo la posibilidad de incrementar la capacidad de producción del mismo sin necesidad de afectar el proceso.

## REFERENCIAS

- [1] Puerta, S. (2004). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. *Revista Lasallista de Investigación* 1 (1), 56-65.
- [2] Schuldt, M. et al. (2007). Lombricultura. Desarrollo y adaptación a diferentes condiciones de temperie. *Revista Electrónica de Veterinaria* VIII (8), 1-10.
- [3] Morales, A. & Calero, B. (2008). La lombriz de tierra y la práctica de la lombricultura en Cuba *Revista Agricultura Orgánica* 1, 37-38.
- [4] Garavito, J. et al. (2012). Descripción de metodologías del sistema de lombricultura para gestión de residuos sólidos orgánicos. Documento. Universidad Militar Nueva Granada.
- [5] Tineo, B. (1994). Crianza y manejo de lombrices de tierra con fincas agrícolas. programa de manejo integrado de recursos naturales. Área de manejo de cuencas. En: CATIE.
- [6] Varnero, M. et al. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 7(1), 28-37.
- [7] Varela, S. & Basil, G. (2011). Uso de compost en la producción de plantines de especies forestales. Cuadernillo 4: Utilización de enmiendas orgánicas.
- [8] Gordillo, F. et al. (2011). Producción y evaluación del proceso de compostaje a partir de desechos agroindustriales de *Saccharum officinarum*. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 37(2), 140-149.
- [9] Grau, J. et al. (2011). Análisis de los incidentes de seguridad clínica. Centre de Recerca en Salud Internacional Barcelona.
- [10] Falcó, A. (2009). Mod 7 Herramientas Calidad. Apuntes de clase.
- [11] Bonals, J. (2001). El trabajo en equipo del profesorado. Editorial GRAO.
- [12] Gándara, F. (2014). Herramientas de calidad y el trabajo en equipo para disminuir la reprobación escolar. *Conciencia Tecnológica* 48, 17-24.
- [13] Sales, M. (2009). Diagrama de Pareto. EALDE Business School.
- [14] Niebel, B. (1990). *Ingeniería Industrial: Métodos, tiempos y movimientos*. Alfaomega.
- [15] Niebel, B. (2001). *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. Mc Graw Hill.
- [16] Cruelles, J. (2012). *Ingeniería industrial, métodos de trabajo, tiempos y su aplicación a la planificación y a la mejora continua*. Alfaomega.
- [17] Gómez, G. (1997). *Sistemas administrativos. Revisión técnica*.
- [18] Wesley, G. & Castek, J. (2000). *Activity diagrams and operation architecture*. Technologies Group Inc.

# Propuesta de un modelo Lean Seis Sigma para el mejoramiento del proceso productivo de la Industria Licorera del Cauca

Javier G. Melo A.<sup>1</sup>

Owen Alvares Z.<sup>2</sup>

Nora F. Arciniegas<sup>3</sup>

Jaime H. Mendoza<sup>4</sup>

Fundación Universitaria de Popayán  
Popayán – Colombia

Esta investigación se realizó con el propósito de desarrollar la aplicación de cada una de las cinco etapas que hacen parte de la metodología DMAIC – Seis Sigma; primeramente, se trabajó la etapa de definición, en donde, se inicia con un Project Charter, el cual contiene la información inicial a cerca del proyecto, se establece el contexto del proceso productivo de la Industria Licorera del Cauca, mediante un mapa de proceso y la caracterización del proceso (SIPOC); seguidamente se realiza el plan de recolección de datos de las bajas del proceso productivo (Envase, Caja, Tapa, Etiqueta), luego los Diagramas de Pareto de los años 2014, 2015, 2016, 2017, en donde se establecen los puntos críticos de los defectos por la cantidad de unidades defectuosas y costos de no calidad para la empresa y finalmente se determina la capacidad de proceso y nivel de Sigma; los datos obtenidos son analizados mediante Diagrama de Ishikawa, Diagrama de Pareto para determinar las estrategias que deben ser utilizadas para minimizar los puntos que afectan el proceso, para ello, en las últimas etapas de mejora y control, se establece una propuesta, utilizando algunas herramientas Lean.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las empresas se encuentran constantemente en la búsqueda de estrategias enfocadas al mejoramiento de los procesos y aumento de la competitividad en el mercado. Es por esto que la aplicación de la metodología DMAIC, proporciona a las empresas una alternativa basada en estadística y métodos científicos impactando positivamente en el mejoramiento de los procesos [1].

La Industria Licorera del Cauca es una empresa pública constituida aproximadamente en el año 1972, la cual produce y comercializa un variado portafolio de licores (Aguardiente Tradicional y Sin Azúcar, Ron Gorgona, Ginebra, Escarchados y Cremas), todos estos productos han sido reconocidos con varios premios a nivel internacional tales como ITQ, San Francisco World Spirit y Monde Selection, además, es considerada como una de las empresas más importante del Cauca, ya que con los recursos generados se contribuye de forma significativa al desarrollo socio-económico del departamento. Este proyecto de investigación tiene como objetivo, crear una propuesta de mejoramiento basada en Lean Seis Sigma, desarrollando cada una de las etapas de la metodología DMAIC, con la finalidad de minimizar las pérdidas económicas (costos de no calidad) que se generan por la cantidad de Bajas (Defectos) presentadas durante la operación normal del proceso productivo.

En la primera etapa, se crean los parámetros para el desarrollo del proyecto tales como: objetivos, alcance, equipo de trabajo, métricas y otros aspectos relevantes para el proyecto, después, mediante el diagrama SIPOC, se establecen los distintos actores que integran el proceso, luego se identifican los puntos críticos para la calidad y se realiza el mapa de proceso. La etapa de medir, se establece la métrica del proceso, es decir, la recolección de datos, medición de la capacidad (Cp, Cpk, Sigma, entre otros) y se realizan las Gráficas P (Gráficos de control por atributos para defectuosos). Después de medir el proceso, se continua a la etapa de analizar, en donde, se establecen las causas raíces que ocasionan los puntos críticos dentro del proceso, por último, en las etapas de medir y controlar, se establece una propuesta para el mejoramiento y control de la variación del proceso, enfocada en la metodología Lean Manufacturing, creada para la eliminación de los distintos despilfarros que se generan en un proceso, para este proyecto, minimizar las bajas (Defectos) por envase, que generan los mayores costos de no calidad para la empresa.

## 2. MÉTODO, RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 2.1 Etapa: Definir

Es una de las etapas más importantes dentro de la metodología DMAIC, ya que se establece el rumbo del proyecto desde el inicio hasta su culminación. Este proyecto está dirigido al planteamiento de una propuesta que permita medir la variación del proceso por medio del desarrollo de las etapas de la metodología DMAIC y mejorar el proceso productivo de la Industria Licorera del Cauca mediante la aplicación de algunas técnicas Lean Manufacturing, además de reducir los costos de no calidad, generados por las bajas (unidades defectuosas) que se producen durante la ejecución del proceso. Para la realización de esta investigación, se cuenta con el apoyo de la Gerencia, el Jefe de la

---

<sup>1</sup> javier.g060710@gmail.com

<sup>2</sup> owenalvarez97@gmail.com

<sup>3</sup> arciniegasfernanda@gmail.com

<sup>4</sup> jaime.mendoza@docente.fup.edu.co

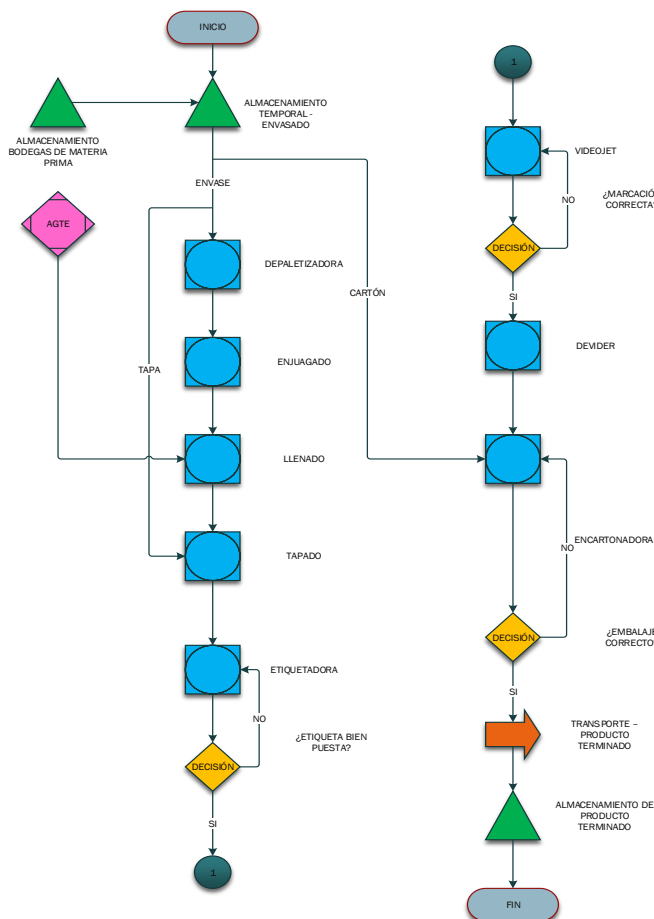
División Producción y de todo el recurso humano de las áreas productivas de la empresa, además, incentivar los procesos académicos de los estudiantes de Ingeniería Industrial, mediante la articulación de la Academia- Industria, con la finalidad de propiciar espacios reales con problemas reales para la investigación. Este proyecto se encuentra enmarcado dentro de los planes operativos de la empresa, para la búsqueda del mejoramiento continuo de sus procesos y aumentar su productividad, confiabilidad, eficiencia.

1. *Project Charter*. En primera instancia se realizó el Project Charter (Tabla 1), que consiste según en “Desarrollar el acta de constitución del proyecto o Project Charter es el proceso que consiste en desarrollar un documento que autoriza formalmente un proyecto o una fase y en documentar los requisitos iniciales que satisfacen las necesidades y expectativas de los interesados” [2].

**Tabla 1.** Project Charter

Título/Propósito	Diseño de un modelo lean seis sigma para el mejoramiento del proceso productivo de la industria licorera del Cauca.
Problema y/o necesidad	La Industria Licorera del Cauca, desea medir, controlar y disminuir los puntos críticos que impactan negativamente en los costos de producción, productividad y eficiencia del proceso de producción.
Objetivo	Diseñar un modelo Lean Seis Sigma para mejorar el proceso productivo de la Industria Licorera del Cauca.
Alcance	Establecer los puntos críticos que generan pérdidas de tipo económico, medir, controlar y minimizar mediante el diseño de planes de acción de mejoramiento para el proceso productivo.
Propietarios	Industria Licorera del Cauca.
Patrocinador	Fundación Universitaria de Popayán.
Equipo de trabajo	J.M (Jefe de la División), J.S (Jefe de Mantenimiento), F.A (Director de Trabajo de Grado), J.M (Ejecutor del proyecto), O.A (Ejecutor del proyecto).
Recursos	Línea de envasado Filling Systems, Datos históricos (áreas de producción y calidad), Software.
Métricas	Bajas de proceso, Producción, Costos de no calidad.
Fecha de inicio	Septiembre de 2017.
Fecha planeada para finalizar el proyecto	Diciembre de 2018.
Entregable del proyecto	Documento final (Trabajo de Grado). Documento de trabajo.

2. *Mapa de proceso del proceso productivo: Envasado*. El proceso de envasado de Aguardiente (Figura 1) para las presentaciones (Tradicional y Sin Azúcar) inicia con el alistamiento de la materia prima (envase, cartón, etiqueta y tapa), el cual es transportado desde la bodega de almacenamiento hasta el área de envasado, donde existe un lugar dispuesto (almacenamiento temporal).



**Figura 1.** Diagrama de envasado

Cada pallet, según sea su presentación, cuenta con una cantidad de unidades específicas, estas son Media Botella: 3.381 unidades, Botella: 1.960 unidades, Garrafa: 770 unidades) hacia la Depaletizadora, utilizando un montacargas; esta máquina es la encargada de desarmar los pallets, prensando cada tendido, ubicándolo sobre la mesa, antes de pasar al sistema de transporte o banda transportadora, el operario que opera la máquina retira el plástico que sujeta a los envases, mientras que otro operario realiza la primera inspección visual para descartar los envases que presentan no conformidades (rotura, manchas, desgaste, entre otros) e informar al área de control de calidad quien los registra en sus formatos. Los envases llegan al Triblock, esta máquina se encarga de realizar tres operaciones: lavar el envase, llenar con el producto (aguardiente) los envases y por último tapar el envase. La Etiquetadora, se encarga de colocar en cada envase la etiqueta, esta máquina también cuenta con un inkjet de marcación, el cual coloca sobre la etiqueta la fecha, la hora y un símbolo característico. Antes de pasar hacia el Injekt de marcación de tapa, se realiza una inspección de verificación de la etiqueta, en caso de rechazo se informa al analista de calidad y se hace un reproceso.

El Injekt de marcación de tapa, se encarga de marcar en la tapa la fecha, hora y símbolo, al igual que en la etiqueta, estos deben coincidir, por tanto, el operario debe estar muy atento, si no coincide debe informar y reprocesar. Seguidamente los envases se dirigen hacia el Devider, que se encarga de separar los envases, acomodándolos en los carriles, antes de llegar a la Encartonadora, en donde son empacados los envases, es importante tener en cuenta que el número de envases por caja va de acuerdo a la referencia, por tanto, para Media Botella, las cajas contienen 24 unidades, para Botella contienen 12 unidades y para Garrafa son 6 unidades. Por último, se marca la caja con la fecha y el lote (A o B) y son apiladas por un operario, antes de pasar al área de producto terminado.

3. *Diagrama SIPOC.* También, es importante establecer los diferentes actores (clientes internos y externos) que intervienen o se ven afectados por los desperdicios generados durante la operación normal del proceso. El cliente externo es todo consumidor o empresa que posee capacidad de contratar o comprar productos y/o servicios, mientras que el cliente interno, son todas aquellas que hacen parte de una empresa y que por tanto intervienen en el desarrollo de una tarea que contribuye en la transformación para la obtención de un producto o en la prestación de un servicio [3]. Para la identificación de las partes directamente implicadas en el proceso productivo, se elabora el Diagrama SIPOC (Figura 2), el cual representa de forma sencilla y gráfica la gestión del proceso productivo [3], para este caso de la Industria Licorera del Cauca. En este Diagrama se puede observar los siete proveedores de materia prima necesaria para la producción de aguardiente (375 C.C., 750 C.C. y 1.750 C.C.) en sus presentaciones: tradicional y sin azúcar, también, se establece el recurso humano que interviene directamente en el proceso productivo.



Figura 2. Diagrama SIPOC

4. *Identificar los CTQ'S (críticos para la calidad) del proceso productivo.* Al realizar la identificación de los actores que intervienen en el proceso, es posible establecer los puntos a tener en cuenta para el mejoramiento del proceso productivo. Mediante la herramienta Critical to Quality Tree o Árbol de requisitos/decisiones, que se utiliza según [4] a "traducir las amplias necesidades del cliente en índices del proyecto específicos, medibles y orientados a la acción, éstos también permiten establecer una relación entre la prioridad del cliente y los parámetros del proyecto CTQ". Para el caso del proceso productivo de la Industria Licorera del Cauca se establece que las bajas de materia prima durante la operación normal del proceso generan pérdidas económicas significativas para la empresa.

Por términos y políticas de privacidad establecida por la empresa no se toman en cuenta los datos de alcohol y esencias, por tanto, solo se enfoca a la materia prima utilizada en el proceso de envasado. Por medio de Árbol de requisitos/decisiones (Figura 3) se pueden establecer de una manera más específica y sencilla las variables a medir, las cuales son el objetivo del proyecto. Para este caso, existen ocho variables que generan bajas (defectos) para el proceso productivo, sin embargo, las bajas producidas por el envase son las que generan el mayor porcentaje de costos de no calidad.

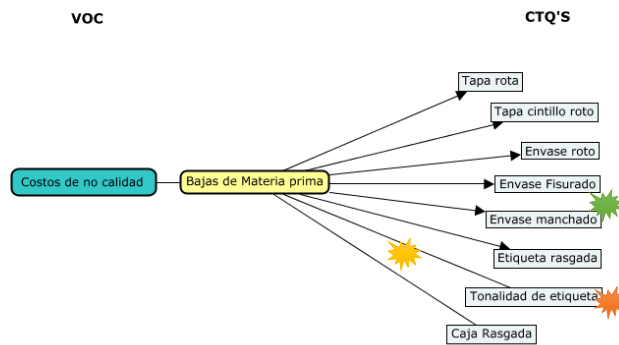


Figura 3. Critical to Quality Tree

## 2.2 Etapa: Medir

Esta etapa tiene como objetivo principal entender de forma más detallada el funcionamiento del proceso y la magnitud del impacto que generan las pérdidas económicas por las bajas de materia prima que se generan durante la normal operación de la infraestructura de producción (maquinaria). De acuerdo al diagrama de Pareto (Figura 4), se observa que las materias primas que generan las mayores pérdidas económicas para la Industria Licorera del Cauca son: Envase Media Botella Sin Azúcar con un total \$3.771.900 equivalente a un 37%, seguidamente del Envase Botella Sin Azúcar con un total \$2.857.910 equivalente a un 28.1% y por último el Envase Media Botella Tradicional con un total \$1.305.302 equivalente a un 13%, por tanto el proyecto debe centrarse en minimizar las Bajas (Defectos) de Envase de las presentaciones anteriormente mencionadas.

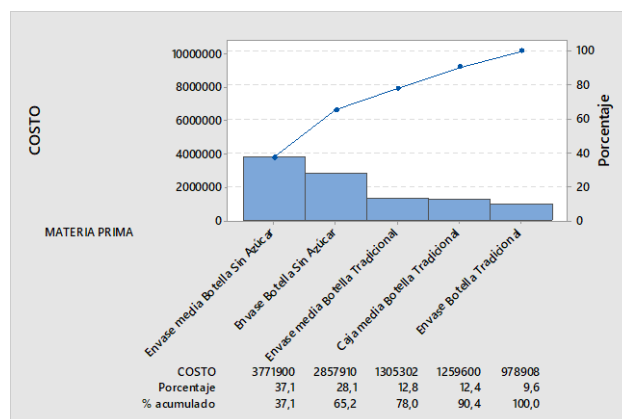


Figura 4. Costo de pérdida por materia prima para el Año 2017

El control de la variabilidad del proceso productivo es fundamental, antes de realizar cualquier análisis que conlleve a establecer acciones de mejoramiento que permitan disminuir los problemas presentes, ya que un proceso inestable genera un amplio riesgo para las acciones que se puedan diseñar en las etapas de análisis, mejora y control. Para verificar la estabilidad del proceso, inicialmente, se obtuvo la información a partir de los informes generados por el área de producción desde el año 2014 al 2017, en donde, se observa la cantidad de Bajas que se generan en el proceso con relación a la cantidad de producción. Inicialmente se hace una prueba de normalidad, se determina la capacidad de proceso y por último se establecen los gráficos de control por atributos (P), que consiste en inspeccionar y clasificar el producto en “conforme” de acuerdo con las especificaciones o “defectuoso” si no existen las conformidades suficientes para su aceptación [5].

1. *Análisis de Capacidad de proceso.* Se inicia un estudio de la capacidad y estabilidad del proceso mediante el uso de Gráficos P por atributos que se utiliza para monitorear una proporción de elementos defectuosos donde los elementos pueden ser clasificados en dos categorías (pasa o no pasa), este tipo de gráficos se utilizan para hacer seguimiento al proceso en el tiempo y así poder controlar cualquier tipo de puntos inestables que lo puedan afectar [6].

En el análisis estadístico realizado se comprobó mediante la prueba de normalidad (Anderson – Darling) que todos los datos se encuentran bajo una distribución normal, con 25 subgrupos, suficientes para un análisis de capacidad captando las diferentes fuentes de variación del proceso y con medidas de tendencia central (Media y Variación) estables, sin puntos fuera de control, tal como se observa en las Figuras 5 a 7.

La tasa de defectuosos es 4,84% para envase de media botella sin azúcar, 7,17% para media botella tradicional y 4,45% para envase botella sin azúcar, la cual estima el porcentaje de partes del proceso que están por fuera de los límites de especificaciones y este comportamiento se mantiene en el largo plazo que es lo más importante porque es lo que puede llegar a experimentar el cliente final.

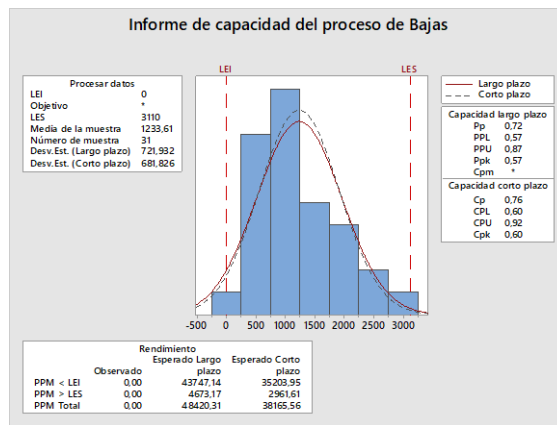


Figura 5. Análisis de capacidad de bajas: Envase Media Botella Sin Azúcar

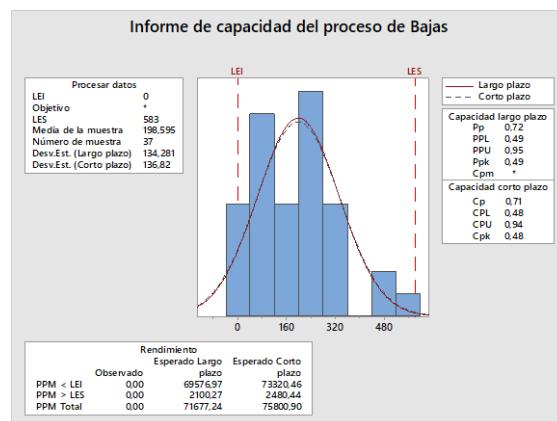


Figura 6. Análisis de capacidad de bajas: Envase Media Botella Tradicional

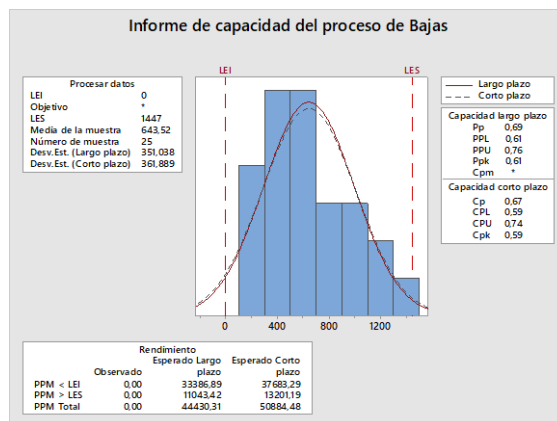
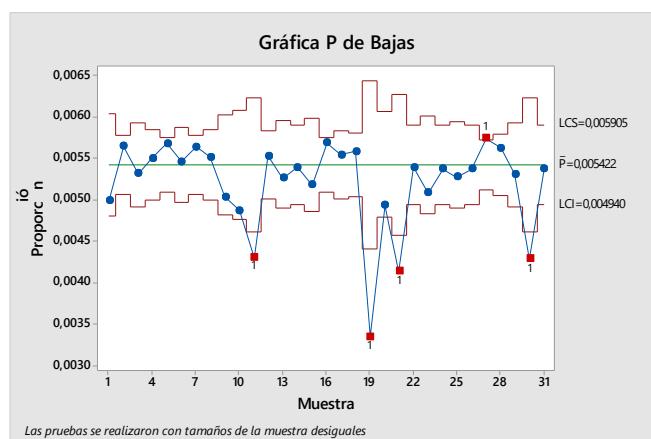
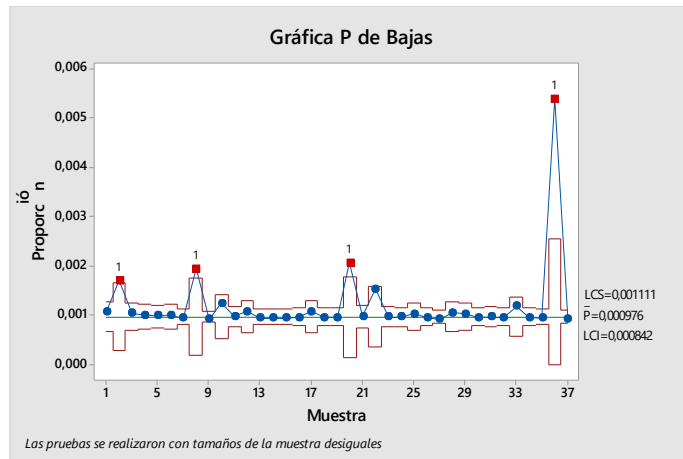


Figura 7. Análisis de capacidad de bajas: Envase Botella Sin Azúcar

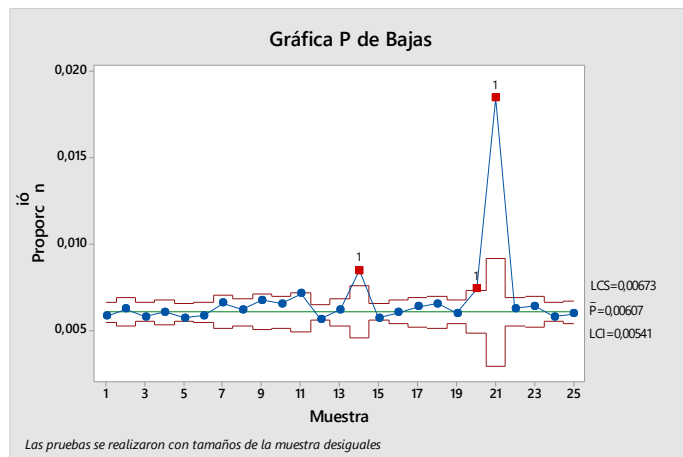
2. *Gráficas de control P por atributos.* La gran ventaja del proceso en estudio es la alta posibilidad de detectar no conformidades y la facilidad de reproceso, se confirma con el mínimo porcentaje de bajas de proceso mostrado en las Figuras 8 a 10, cuyos límites de especificaciones es bastante cerrado.



Gráfica 5. Gráfica P por atributos de bajas: Envase Media Botella Sin Azúcar



**Gráfica 6.** Gráfica P por atributos de bajas: Envase Media Botella Tradicional

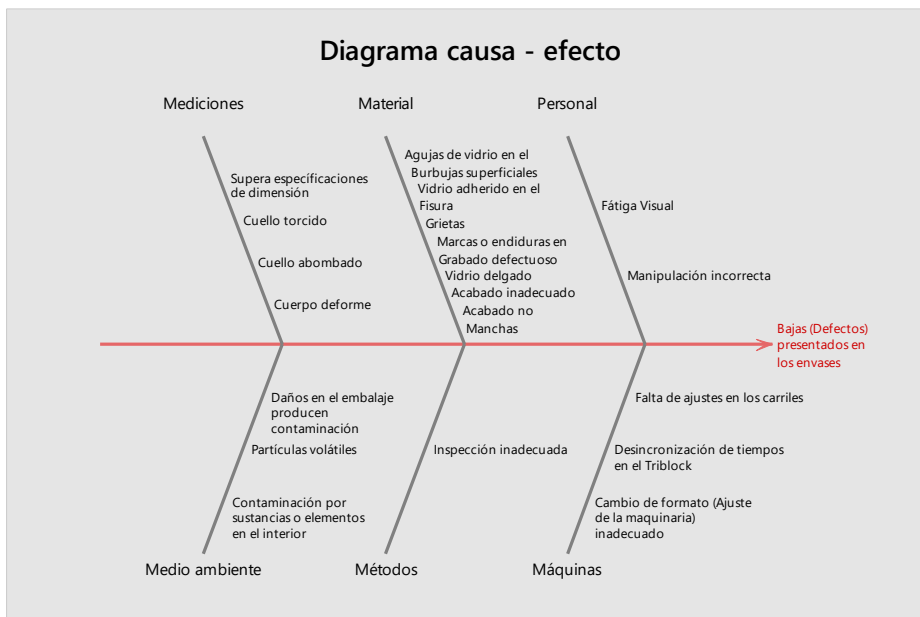


**Gráfica 7.** Gráfica P por atributos de bajas: Envase Botella Sin Azúcar

### 2.3 Etapa: Analizar

En la etapa de análisis se identifican las causas que provocan la inestabilidad para el proceso y que generan las bajas (defectos) por envase de media botella sin azúcar, media botella tradicional y botella sin azúcar en el proceso. Con la propuesta de mejoramiento estas causas sean controladas y presentar resultados favorables en poco tiempo.

A través del diagrama causa – efecto o diagrama de Ishikawa, es una herramienta gráfica que relaciona un problema o efecto con las posibles causas que lo ocasionan [7], y mediante un evento kaizen o lluvia de ideas, se procedió a identificar las causas potenciales que originan las bajas para cada uno de los problemas enfocados (método de las 6 M) [7]. En el Diagrama causa – efecto se establecen las causas que afectan el proceso, estas son captadas mediante observación, en donde se observaron 24 causas potenciales que producen las bajas por envase (Figura 4).



**Figura 4.** Diagrama causa – efecto



## 2.4 Etapas: Mejorar y Controlar

En estas etapas se establecen las soluciones que controlen y minimicen las causas raíces para corregir el problema, además de estabilizar el proceso, evitando más pérdidas económicas por bajas. Para el proyecto, se establece, que es importante la búsqueda de estrategias que mejoren las condiciones de operación del proceso con el fin de minimizar las causas raíces (Figura 3). Actualmente la empresa, trabaja en el mejoramiento del proceso, trabajando de la mano con la metodología Lean Manufacturing, mediante la herramienta de Mantenimiento Productivo Total (TPM) para reducir los desperdicios [8] que se generen en la empresa [9], especialmente en la infraestructura de producción (maquinaria y equipos), por tanto, el equipo de trabajo, decide que es conveniente crear una propuesta de mejoramiento que pueda minimizar la variabilidad del proceso y controlarlo basado en el pilar de mejoras enfocadas del TPM [10].

1. *Propuesta de mejoramiento: Mejoras enfocadas (Kobetsu Kaizen) [8]*. Son actividades que comprometen a las distintas áreas que conforman el proceso productivo y cuyo objetivo principal es maximizar la eficiencia global de los equipos del proceso, conformando equipos interdisciplinarios, planteando procedimientos enfocados en el control y minimización de las variables críticas del proceso. Las principales variables que se pueden ser controladas con este pilar son:

- Averías de las máquinas o equipos.
- Paradas no programadas.
- Pérdida de la capacidad.
- Unidades defectuosas.
- Defectos del proceso.
- Mal funcionamiento de la maquinaria o equipos en general.
- Reprocesos

Para desarrollar el pilar de mejoras enfocadas en la Industria Licorera del Cauca se establecen siete pasos:

- Selección de tema de estudio: Se realiza la selección de las áreas, donde se desarrollarán los programas de mejora continua.
- Establecer el comité: Se establece un comité interdisciplinario que encabezará las actividades de mejoramiento continuo. Este comité de TPM, definirá los objetivos, misión, cronograma de actividad, costos y demás aspectos importantes para el inicio del programa de TPM y de los proyectos de mejora continua.
- Situación actual y formulación de objetivos: El comité define el problema y lo analiza, identificando los puntos críticos del proceso que ocasionan desperdicios. Para este paso, se utilizan distintas herramientas para la recolección de información sobre averías, paradas no programadas, reparaciones, control estadístico de bajas de proceso y tiempos, entre otros puntos importantes que intervienen en el proceso productivo.

Luego de definir el problema de estudio, se establecen los objetivos, estos deben ser medibles y alcanzables.

- Diagnóstico: Antes iniciar a plantear propuestas de mejora para dar solución al problema de estudio, se establecen las condiciones iniciales del equipo que garantice su adecuado funcionamiento. Dentro de estas condiciones se incluyen: limpieza, desinfección, lubricación, inspecciones, verificación, ajuste de piezas de anclaje, entre otros factores que influyen significativamente la normal operación de la maquinaria y equipos.

Es importante establecer estándares que permitan la eliminación de aquellas fuentes de contaminación, fugas, escapes, suciedad. En esta parte, se desarrolla un programa de 5'S y mantenimiento autónomo conjuntamente en las áreas de estudio para las mejoras enfocadas.

- Formulación del plan de acción: Una vez, se ha recolectado la información sobre las diferentes causas que afectan el proceso productivo, se establecen los planes de acción para la eliminación de las variables críticas para el área de mantenimiento y el proceso productivo en general. Este plan de acción debe contener las actividades específicas necesarias que permitan cumplir los objetivos planteados por el comité de TPM.
- Implementación, estandarización y perfeccionamiento de mejoras: Es importante contar con la participación activa de todo el personal que conforma las áreas productivas en el desarrollo de los programas de mejoramiento continuo. Cuando se realicen cambios en la metodología, en los procedimientos, instructivos y formatos, se debe incluir las propuestas, sugerencias y opiniones de las personas que intervienen en el proceso. Al final, de este paso, el sistema de gestión de calidad de la empresa, realizara auditorias con el fin de que los miembros del comité evalúen el progreso de los programas y puedan identificar nuevas estrategias de mejoramiento para la reducción de pérdidas.
- Evaluación de resultados: Mediante el establecimiento de indicadores de gestión o KPSI's, se evalúan los resultados obtenidos, en el desarrollo de los programas, estos resultados deben ser compartidos a todo el personal de la empresa, mediante la publicación en los tableros de control. El comité de TPM, se encarga de coordinar cada uno de los programas, llevan un control y seguimiento de los mismos, para garantizar que todas las actividades se ejecuten en el tiempo establecido.

### **3. CONCLUSIONES**

En el presente capítulo se desarrolló la propuesta de un modelo basado en las metodologías Lean Seis Sigma para el mejoramiento del proceso productivo y competitividad de la Industria Licorera del Cauca, que busca distintas estrategias de mejoramiento continuo para sus procesos para garantizar el crecimiento y éxito organizacional. El proyecto se enfocó en el desarrollo de las etapas que componen el DMAIC, enfocado a la disminución de costos de no calidad por bajas de materia prima, en donde se identificó, que los envases de las presentaciones media botella sin azúcar, media botella tradicional y botella sin azúcar, generaron el mayor porcentaje de pérdida, se midió el proceso para identificar la variación del proceso y así, se establecieron las acciones correctivas para el control del mismo, buscando disminuir las 24 causas potenciales encontradas por el equipo de trabajo, buscando impactar significativamente en el aumento de la productividad, la calidad y disminuir los costos de producción, se creó una propuesta basada en el pilar de mejoras enfocadas (TPM) que establece las prácticas correctas para la normal operación del proceso. Es importante resaltar, que este proyecto, debe continuar su perfeccionamiento con el fin de garantizar un proceso controlado, eficiente y eficaz.

## REFERENCIAS

- [1] Dubé, D. et al. (2017). Procedimiento de mejora de la cadena inversa utilizando metodología seis sigma. *Ingeniería Industrial XXXVIII*(3), 247-256.
- [2] García, R. (2013). [El Proyect Charter](#). Online [Dec 2017].
- [3] Bernal, M. (2014). Importancia del cliente interno y externo en las organizaciones. Universidad Militar Nueva Granada.
- [4] Sharma, M. (2014). [Una herramienta para profundizar en los factores críticos para la calidad](#). Online [Dec 2017].
- [5] Vieira, S. (2012). *Estatística para a qualidade*. Elsevier.
- [6] Minitab (2017). [Revisión general de Gráfica P](#). Online [Nov 2017].
- [7] Gutiérrez, P. & De La Lara, S. (2009). *Control estadístico de calidad y seis sigma*. McGraw Hill.
- [8] Arciniegas, S., Mendoza, J. & Segura, M. (2017). Technical Assistance in Documentation and Instructive Updating Supported in the "S.M.E.D". To Change of Format in the Package Line in the "Licorera Del Cauca" Industry. En: International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Bogotá, Colombia
- [9] Arciniegas, S. (2017). Propuestas para mejorar la productividad mediante la aplicación de técnicas del Lean Manufacturing en el proceso productivo de preparación y envasado de aguardiente en la industria licorera del cauca. Trabajo de grado. Fundación Universitaria de Popayán.
- [10] Parrado, A. & Sánchez, B. (2004). Estructuración e implementación del pilar de mejora enfocada en Tetra Pak Colombia. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana.

# Mejoramiento del proceso de abastecimiento mediante Kraljic y Analytic Hierarchy Process - AHP en una empresa del sector textil

Daniel Valencia P.<sup>1</sup>

Carlos Cardona V.<sup>2</sup>

Karla C. Álvarez U.<sup>3</sup>

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Medellín – Antioquia

La compra de materias primas se presenta como uno de los procesos más complejos en la cadena de suministro. El número de proveedores y su ubicación dispersa se combinan con la influencia directa sobre el producto final, haciendo que cualquier mejora del proceso sea de suma importancia. Este trabajo presenta la aplicación de las metodologías Kraljic y Analytic Hierarchy Process (AHP) aplicado en una empresa textil colombiana. Kraljic clasifica al proveedor para definir la estrategia de compra más adecuada, minimizando los riesgos de suministro y aumentando la rentabilidad, orientando al área de compras a los productos apalancados y estratégicos definidos, analizando las estrategias de desarrollo de proveedores o relacionamiento de acuerdo al tipo de producto e identificando el soporte tecnológico para cada tipo de insumo. El proceso AHP busca obtener un conjunto de proveedores a través de una estructura jerárquica, utilizando una escala de prioridades previamente definida en la metodología Kraljic, considerando costos de compra e imprevistos por falta en las entregas de suministros. La combinación de estas metodologías permite al departamento de compras tomar decisiones basadas en la prioridad de alternativas tomando en cuenta criterios predefinidos que se consideran estratégicos para la compañía.

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión del abastecimiento representa un proceso clave para la productividad y competitividad de las empresas. Las cadenas de suministro y su logística deben soportar la sostenibilidad y sus ventajas competitivas a través de integraciones verticales que requieren de modelos de colaboración con los involucrados en los procesos de la organización [1]. Diversos fabricantes invierten entre el 50% y el 70% de cada dólar obtenido en ventas, comprando materiales e insumos. Su éxito debe basarse entonces, fuertemente en el rendimiento de sus proveedores y componentes comprados [2]. Diversos estudios revelan grandes debilidades en la gestión logística de cara al abastecimiento y a la formulación de estrategias logísticas para alcanzar mercados regionales, nacionales e internacionales.

El uso de modelos de cartera por parte de pequeñas y medianas empresas (PYME) es mucho menor que el de las grandes empresas [3]. Las decisiones de compra en las pequeñas empresas son generalmente tomadas por el propietario o unos pocos elegidos sobre la base de la intuición y la experiencia personal [4], sumado a que pueden tener dificultades para interesarse en el desarrollo y la colaboración de sus proveedores dado que eventualmente poseen poco poder adquisitivo, careciendo del recurso de gestión para encontrar y desarrollar proveedores y soluciones alternativas [5].

En este estudio se propone una estructura para el proceso de abastecimiento en una compañía del sector textil colombiano bajo un sistema de gestión de proveedores y un plan estratégico de compras. Se utiliza la matriz de Kraljic, en el cual los artículos comprados se clasifican de acuerdo a dos dimensiones: a) importancia de la compra y b) complejidad del mercado de suministro. Los ítems se clasifican evaluándolos y posicionándolos en uno de los cuatro cuadrantes del modelo de cartera bidimensional. Los modelos de cartera de compras permiten a una empresa identificar los artículos adquiridos más importantes desde el punto de vista de la estrategia de compra, ayudándola a lograr una ventaja competitiva sostenible y una alta rentabilidad a través de estrategias de compra diferenciadas [3, 6]. Adicional y para efectos del plan de acción, se emplea en este trabajo el proceso analítico jerárquico o AHP para la selección de proveedores, que permitirá la obtención de ofertas más beneficiosas para la compañía, generando una fuerte competencia entre proveedores y proporcionando un orden de selección que facilita la negociación [7]. Este trabajo se organiza de la siguiente forma: inicia con una presentación de la literatura, se presenta en la sesión 3 el caso de estudio y la metodología propuesta para el caso particular, orientada en cinco etapas principales, y finalmente se exponen los resultados y conclusiones obtenidas desde el desarrollo.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Matriz de Kraljic

Kraljic [8], introdujo un enfoque de cartera de compras en el cual los artículos comprados se clasifican basados en varias dimensiones. La matriz de Kraljic, es una caracterización de proveedores a través de una gráfica compuesta por: importancia del producto/servicio comprado sobre el resultado financiero de la empresa o impacto en el

---

<sup>1</sup> [daniel41b@gmail.com](mailto:daniel41b@gmail.com)

<sup>2</sup> [Cardona1224@gmail.com](mailto:Cardona1224@gmail.com)

<sup>3</sup> [karlaalvarez@itm.edu.co](mailto:karlaalvarez@itm.edu.co)

resultado como primer eje; y el riesgo de suministro del producto/servicio adquirido o riesgo en el incumplimiento, como segundo eje [9]. La matriz consiste en un análisis del portafolio con la cual se posiciona las distintas categorías de proveedores (apalancados, estratégicos, rutinarios y críticos) según los cuadrantes que la componen [10]. Se definen las cuatro categorías de productos así [11]:

- **Productos Apalancados:** Son aquellos que tienen una alta oferta en el mercado, por lo que siempre existirá una alternativa de proveedor.
- **Materiales Estratégicos:** Son aquellos que deben planearse con mayor detenimiento, dado que tienen tanta o más importancia que los anteriores como componentes de los productos de la empresa, pero existe poca oferta en el mercado.
- **Productos Rutinarios:** Son aquellos que combinan un bajo impacto económico y un bajo riesgo de suministro.
- **Materiales Cuello de Botella:** Estos insumos no tienen un mayor impacto financiero en el producto total, pero su ausencia genera un estancamiento en la elaboración de los productos, sin ellos el producto no podría ser terminado o despachado.

Se propone el uso de cuatro etapas para idear estrategias de compra. Estas etapas consisten en clasificar todos los ítems o componentes comprados en términos del impacto en las utilidades y el riesgo de suministro; analizar el mercado de oferta para esos materiales; determinar una posición estratégica de suministro; y desarrollar estrategias de materiales y planes de acción [8]. A través de una revisión de la literatura, se presenta en la Tabla 1, algunas aplicaciones de la Matriz de Kraljic clasificada por autor y su característica principal abordada:

**Tabla 1.** Variables empleadas en estudios previos para matriz de Kraljic

<b>Autor</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Característica del estudio</b>
[8]	-	Mejoras en el volumen y porcentaje del costo total de la compra, impacto en la calidad del producto, crecimiento del negocio. Disponibilidad, demanda competitiva.
[12]	-	Pensamiento crítico, sofisticación de la gestión de compras, prácticas avanzadas con respecto a los modelos de cartera de compras, métodos de medición distintivos.
[13]	Industrial	Metodología para el posicionamiento objetivo de productos básicos en la matriz Kraljic. Enfoque difuso de las múltiples utilidades. Reducción de las dimensiones para proveer el riesgo y el impacto en los beneficios
[14]	Organizaciones virtuales	Beneficiarán del uso del modelo para tomar decisiones sobre decisiones de compra y mejoramiento de relaciones a largo plazo con los proveedores
[15]	Industrial-ensamble	Reducir el impacto en el riesgo de ganancias y suministros mediante la reducción de costos y la mejora de la calidad, mientras que el riesgo de suministro se reduce al mejorar el tiempo de entrega y el perfil de los proveedores.
[16]	Industrial	Análisis factorial para evaluar el riesgo de suministro
[17]	Industrial	Comparación de modelos de posicionamiento en la matriz Kraljic.
[18]	Industria digital	Beneficios del modelo Kraljic para tomar decisiones de compra y para establecer relaciones a largo plazo con proveedores. Redes flexibles entre proveedores y compradores.
[19]	Industrial-químico	Mejora en la competitividad de la compra de los suministros, calidad, costes de compra, flexibilidad en el suministro y velocidad en los tiempos de entrega El estudio muestra la importancia del trabajo sincronizado, que mejora la coordinación interna, pero no en unidades de negocios.
[20]	-	Propone estrategias de compra en la matriz de Kraljic - Una perspectiva de poder y dependencia. Interioriza sobre la dependencia de los compradores con el proveedor, Compara el poder y la interdependencia para las estrategias de compra dentro de cada cuadrante de Kraljic, Describe los escenarios correspondientes para las estrategias de compra.

## 2.2 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El AHP es definido como una sencilla, lógica y estructurada metodología de trabajo que permite mejorar la toma de decisiones complejas cuando existen múltiples criterios o atributos mediante la descomposición del problema en una estructura jerárquica [21]. Al subdividir un conjunto de atributos complejos en uno más sencillo se logra determinar su influencia en el objetivo de la decisión. Esa influencia está definida por los pesos que son asignados a cada uno de los atributos o criterios. El AHP establece dichos pesos a través de comparaciones pareadas con lo que se facilita la objetividad del proceso evitando el uso de la intuición en la toma de decisiones [22].

En general los estudios realizados a partir del trabajo realizado por Saaty [23], han aportado en gran medida al entendimiento sistemático de múltiples problemas aplicados a sectores de la economía, desarrollando y mejorando conjuntamente la metodología del análisis AHP. Los cuatro criterios más utilizados para la selección de proveedores son: la calidad, el costo, los tiempos de entrega y la tecnología [24]. De acuerdo a la revisión de la literatura, se presenta en la Tabla 2, los criterios y atributos de selección empleados en diferentes estudios para la aplicación de la metodología AHP.

## 3. CASO DE ESTUDIO

Actualmente el área de compras de la compañía en estudio hace parte de uno de los eslabones más importantes de la cadena de suministro dado que es la encargada de suministrar a las demás áreas los elementos indispensables para su adecuado funcionamiento tales como: materia prima, herramientas, materiales, papelería, servicios, entre otros.

Cualquier retraso o falla en la calidad de estos elementos dará como resultado una serie de no conformidades que hacen ineficiente el proceso. La principal función de esta área es adquirir los suministros textiles que requiera la fábrica según las órdenes de producción; teniendo en cuenta la optimización de los costos y la solicitud adecuada de las cantidades requeridas por cada proceso.

**Tabla 2.** Criterios – atributos de selección según la literatura

<b>Autor</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Criterios – atributos de selección</b>
[24]	Textil	- Relaciones Comerciales - Calidad del Producto - Precio - Facilidades de pago - Reconocimiento de Marca
[25]	Finanzas	- Cotización de los títulos - Rentabilidad de la inversión - Riesgo de los títulos - Coeficiente de variación de los títulos
[26]	Administración y Negocios	- Alineación Cultural - Compromiso con la calidad - Estabilidad Financiera - Calidad en distribución - Trazabilidad de la carga
[27]	Selección de Proveedores	- Calidad - Precio - Entrega - Servicio
[28]	Desarrollo Estratégico de Proveedores	- Calidad - Conocimiento del proveedor - Precio - Alta capacidad de gestión - Evaluación del Riesgo del proveedor - Potencial de mejora en la entrega
[29]	Selección de Proveedores	- Calidad - Costo - Entrega
[30]	Selección de Proveedores	- Calidad - Tecnología - Servicio - Flexibilidad
[31]	Selección de Proveedores	- Servicio - Disponibilidad - Riesgo
[32]	Selección de Proveedores	- Capacidad - Reconocimiento mercado - Finanzas - Responsabilidad frente al cliente
[33]	Logística y producción	- Control del abastecimiento - Sistemas de servicio - Calidad - Tecnología
[34]	Selección de Proveedores	- Calidad - Tecnología - Ubicación locativa - Finanzas
[35]	Selección de Proveedores	- Calidad - Tecnología - Servicio
[36]	Selección de Proveedores	- Calidad - Entrega - Confianza - Garantías
[37]	Selección de Proveedores	- Calidad - Costo - Entrega
[38]	Selección de Proveedores	- Calidad - Costo - Entrega - Ubicación

A pesar de que el área de compras se presenta como un actor fundamental dentro de la compañía, no cuenta con procedimientos analíticos que le permitan tomar la mejor decisión frente a las múltiples alternativas de proveedores que se encuentran en el mercado. Debido a esta falta de planeación, se presentan eventos donde algunos insumos adquiridos tienen un precio de compra bajo que permiten maximizar las ganancias de la orden; sin embargo, éstos no cuentan con la calidad esperada por el cliente, afectando directamente la imagen de la compañía. En ocasiones los compromisos de entrega pactados con el cliente se ven afectados por el incumplimiento en los tiempos de respuesta ofrecidos por los proveedores, retrasando de esta forma la línea de producción e impactando negativamente la

rentabilidad final de la orden por sobrecostos operativos y administrativos. Sumado a esto, otro factor que se ha dejado de lado son las condiciones de financiamiento sobre las cuales no se realiza una negociación previa con el proveedor, afectando la liquidez de la compañía en el mediano y largo plazo.

La aplicación de la metodología Kraljic en el proceso de compras de la compañía permite crear un sistema estratégico para la selección de proveedores haciéndolo más dinámico y estandarizado en la ejecución de sus operaciones. Al realizar la clasificación y ubicación de los insumos requeridos por la línea seleccionada, logrará conocer su impacto en el costo total de la producción y el riesgo de suministro que representan, minimizando las probabilidades de incumplimiento en los tiempos de entrega suscritos con los clientes. Por su parte el análisis AHP permite construir un modelo jerárquico de manera eficiente y tomar la mejor decisión sobre los proveedores según los criterios que la compañía necesita para ser sostenible y rentable en el tiempo. El conjunto de metodologías aplicadas permite aumentar los beneficios asociados al mejoramiento del departamento, teniendo en cuenta las condiciones de financiamiento que los proveedores pueden ofrecer o que la compañía puede negociar según su posición de compra en el mercado. Se esquematiza los pasos a seguir de acuerdo a las metodologías teóricas existentes tratadas en este trabajo (ver Figura 1).

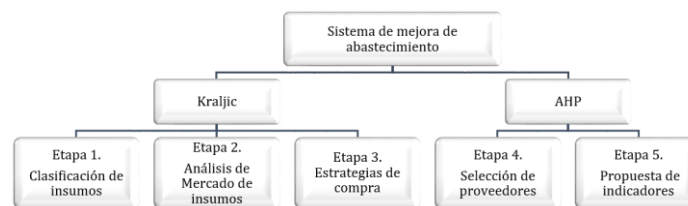


Figura 1. Propuesta metodológica para el sistema de abastecimiento de la compañía

### 3.1 Aplicación de metodología Kraljic

- ETAPA 1. Clasificación de insumos.** Esta etapa consta de las actividades: Selección de la familia o línea de productos para objeto de estudio; Medición de la dimensión "riesgo de suministro"; Medición de la dimensión "impacto financiero", y ubicación de los insumos en la matriz Kraljic. Los datos suministrados por el ERP BUSINT de la compañía, permite extraer la información de ventas por unidad de los productos durante los años últimos años, (Ver Figura 2). Para efectos procedimentales se seguirá en este estudio la línea de producto "Hombre Adulto" por considerarse según los análisis, estratégica para la evaluación y seguimiento.

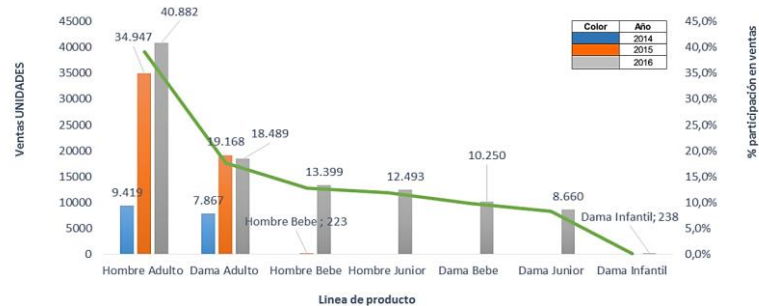


Figura 2. Crecimiento por línea de producto

Según Lee y Drake [39] proponen que se puedan utilizar dos factores simples para evaluar el "riesgo en el mercado de suministro". En primer lugar, el tamaño del proveedor es una forma de medir el poder del proveedor utilizado por Olsen y Ellram, partiendo del supuesto de que el poder suele estar relacionado con el tamaño.

Larson, Carr, y Dhariwal [40] sostienen que las pequeñas empresas son dependientes y en posiciones de negociación menos poderosas en la gestión de la cadena de suministro. Un comprador debe evaluar el "tamaño del proveedor" en relación con su propio tamaño en lugar de en términos absolutos, ya que es el tamaño relativo que determina fundamentalmente el poder. En segundo lugar, la medida "condiciones de monopolio" se utiliza para combinar y simplificar el uso de características del producto y características medioambientales. En cuanto a los subfactores, si una compra exhibe "novedad" o "complejidad" entonces normalmente estará disponible solo uno o muy pocos proveedores, lo que significa que hay monopolio o en el mejor de los casos, oligopolio, condiciones que crean riesgo.

Para determinar el valor del riesgo de suministro se utilizan los valores del cuadro de la Figura 3. Esta matriz combina dos factores: tamaño del proveedor y condiciones del mercado, con el objetivo de calificar el riesgo en el mercado de la oferta. De esta forma, los evaluadores otorgan un puntaje sobre el riesgo de abastecimiento de los materiales, según los criterios. Para ello, se coloca una calificación de 1 a 9. En el caso de las telas, el encargado de las compras locales y nacionales considera una calificación de 9, pues la cantidad de proveedores que abastecen dicho material es alta. Además, el tamaño o poder de los proveedores actuales es grande, ya que son empresas grandes, reconocidas y bien establecidas en su sector comercial. La Tabla 3 muestra los valores que califican esta dimensión, realizada de manera independiente. El promedio obtenido de las tres valoraciones, es el punto que ubica cada insumo en la matriz para el eje X.

Número de proveedores	Pocos	5	7	9
	Varios	3	5	7
	Muchos	1	3	5
		Pequeño	Mediano	grande

**Figura 3.** Matriz de Puntuación Riesgo de suministro [39]

**Tabla 3.** Puntuaciones de riesgo en el mercado de suministro

Insumo	Encargado de compras locales y nacionales	Gerente comercial	Analista de costos	Promedio (eje X) impacto financiero
Telas	9	7	9	8,33
Marquilla cartón y cuero	5	7	5	5,67
Cremallera	9	7	9	8,33
Remache	7	5	9	7,00
Etiqueta	7	7	5	6,33
Botón metálico	7	5	7	6,33
Bolsas	3	3	1	2,33
Cordones	5	5	3	4,33
Marquilla composición	3	3	3	3,00
Aplique	5	5	7	5,67
Botón pasta	7	5	7	6,33
Sesgo	7	5	5	5,67
Marquilla tejida	5	5	3	4,33
Elástico	5	7	7	6,33
Marquilla tejida talla	3	3	1	2,33
Adhesivo	3	3	5	3,67
Adhesivo código barras	1	1	1	1,00
Hiladilla	5	5	3	4,33
Accesorios	3	5	3	3,67
Plastiflechas	1	1	1	1,00

Se ha argumentado a lo largo de la literatura que las empresas compiten en el mercado en virtud de una o más de las cuatro prioridades competitivas básicas: costo, calidad, plazo de entrega y flexibilidad. Lee y Drake [39], miden la importancia de la calidad en función de la durabilidad, fiabilidad e innovación del componente. La importancia de la disponibilidad, es medida en función de la importancia de la flexibilidad de volumen, flexibilidad de modificación y capacidad tecnológica. Por su parte, la importancia del costo se mide en función de la importancia del costo de compra, costo de inventario y costo de calidad. Finalmente, la importancia del tiempo, se mide en función de la importancia de velocidad y fiabilidad de entrega y velocidad de desarrollo.

Para determinar el valor del material, se utilizan los criterios mencionados. La ponderación de los mismos se realiza basados a la técnica del proceso analítico jerárquico AHP. En tal sentido, es necesario generar una escala de valores del 1 al 9, con la finalidad de poder realizar las comparaciones por pares de los criterios. La Tabla 4 presenta las matrices de comparación para el evaluador.

**Tabla 4.** Matrices de Comparación por pares de criterios y sub-criterios

Prioridad competitiva	Calidad	Disponibilidad	Costo	Tiempo
Calidad	1,00	3,00	4,00	5,00
Disponibilidad	0,33	1,00	2,00	2,00
Costo	0,25	0,50	1,00	2,00
Tiempo	0,20	0,50	0,50	1,00
<b>Total</b>	1,8	5,0	7,5	10,0
Calidad	Durabilidad de componentes	Confiabilidad de componentes	Innovación de componentes	
Durabilidad de componentes	1,0	1,0	3,0	
Confiabilidad de componentes	1,0	1,0	2,0	
Innovación de componentes	0,3	0,5	1,0	
<b>Total</b>	2,3	2,5	6,0	
Disponibilidad	Flexibilidad de volumen	Flexibilidad de modificación	Capacidad tecnológica	
Flexibilidad de volumen	1,0	2,0	3,0	
flexibilidad de modificación	0,5	1,0	2,0	
Capacidad tecnológica	0,3	0,5	1,0	
<b>Total</b>	1,8	3,5	6,0	
Costo	Costo de compra	Costo de inventario	Costo de calidad	
Costo de compra	1,0	6,0	3,0	
Costo de inventario	0,2	1,0	0,5	
Costo de calidad	0,3	2,0	1,0	
<b>Total</b>	1,5	9,0	4,5	
Tiempo	Velocidad de entrega	Confiabilidad de entrega	Velocidad desarrollo	
Velocidad de entrega	1,0	3,0	5,0	
Confiabilidad de entrega	0,3	1,0	2,0	
Velocidad desarrollo	0,2	0,5	1,0	
<b>Total</b>	1,5	4,5	8,0	



Como se sugiere por Saaty y Vargas [41], la media geométrica (la raíz  $n$  del producto de  $n$  elementos), en lugar de la media aritmética, se utiliza para consolidar las matrices de comparación pares de los evaluadores individuales. Esto produce las "matrices normalizadas" en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Media geométrica de la comparación por pares.

<b>Prioridad competitiva</b>	<b>Calidad</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Peso prioritario</b>
Calidad	0,56	0,60	0,53	0,50	0,55
Disponibilidad	0,19	0,20	0,27	0,20	0,21
Costo	0,14	0,10	0,13	0,20	0,14
Tiempo	0,11	0,10	0,07	0,10	0,09
<b>CR (Proporción de consistencia)</b>					0,021
<b>Calidad</b>	<b>Durabilidad de componentes</b>	<b>Confiabilidad de componentes</b>	<b>Innovación de componentes</b>	<b>Peso prioritario</b>	
Durabilidad de componentes	0,43	0,40	0,50	0,44	
Confiabilidad de componentes	0,43	0,40	0,33	0,39	
Innovación de componentes	0,14	0,20	0,17	0,17	
<b>CR (Proporción de consistencia)</b>					0,016
<b>Disponibilidad</b>	<b>Flexibilidad de volumen</b>	<b>Flexibilidad de modificación</b>	<b>Capacidad tecnológica</b>	<b>Peso prioritario</b>	
Flexibilidad de volumen	0,55	0,57	0,50	0,54	
flexibilidad de modificación	0,27	0,29	0,33	0,30	
Capacidad tecnológica	0,18	0,14	0,17	0,16	
<b>CR (Proporción de consistencia)</b>					0,008
<b>Costo</b>	<b>Costo de compra</b>	<b>Costo de inventario</b>	<b>Costo de calidad</b>	<b>Peso prioritario</b>	
Costo de compra	0,67	0,67	0,67	0,67	
Costo de inventario	0,11	0,11	0,11	0,11	
Costo de calidad	0,22	0,22	0,22	0,22	
<b>CR (Proporción de consistencia)</b>					0,000
<b>Tiempo</b>	<b>Velocidad de entrega</b>	<b>Confiabilidad de entrega</b>	<b>Velocidad desarrollo</b>	<b>Peso prioritario</b>	
Velocidad de entrega	0,65	0,67	0,63	0,65	
Confiabilidad de entrega	0,22	0,22	0,25	0,23	
Velocidad desarrollo	0,13	0,11	0,13	0,12	
<b>CR (Proporción de consistencia)</b>					0,003

Saaty introduce el índice de consistencia (CI) para medir la "cercanía a la consistencia absoluta":  $CI = (\lambda_{max} - n)(n - 1)$ . Luego de la medición de la cercanía a la consistencia absoluta, existe entonces la necesidad de interpretar el nivel para determinar si es aceptable, es decir, lo suficientemente cerca de cero. La base de Saaty para tomar esta decisión comienza con la premisa de que si el analista tiene poca o ninguna información sobre los factores que se comparan, entonces los juicios parecerán aleatorios [42]. Saaty introduce entonces el coeficiente de consistencia (CR) para evaluar si una matriz es suficientemente. Esta es la relación entre el CI y el índice aleatorio (RI), que es el CI de una matriz de comparaciones generadas al azar:

Considerando la Tabla 5, la Compañía ha generado un peso de 0,55 para la calidad, al calificarlo con los otros criterios (disponibilidad, costo y tiempo). Dentro de la calidad, se ha asignado un peso de 0,44 a la durabilidad de los componentes al calificarlo frente a la fiabilidad y la innovación de componentes. Por lo tanto, el peso total global para la durabilidad de los componentes es 0,24 (ver Tabla 6 para las demás medidas).

**Tabla 6.** Combinación de pesos de criterios y sub-criterios.

<b>Prioridad competitiva</b>	<b>Peso Local</b>	<b>Medidas prioritarias competitivas</b>	<b>Peso Local</b>	<b>Peso global</b>
Calidad	0,55	Durabilidad de componentes	0,44	0,24
		Confiabilidad de componentes	0,39	0,21
		Innovación de componentes	0,17	0,09
Disponibilidad	0,21	Flexibilidad de volumen	0,54	0,12
		flexibilidad de modificación	0,30	0,06
		Capacidad tecnológica	0,16	0,03
Costo	0,14	Costo de compra	0,67	0,10
		Costo de inventario	0,11	0,02
		Costo de calidad	0,22	0,03
Tiempo	0,09	Velocidad de entrega	0,65	0,06
		Confiabilidad de entrega	0,23	0,02
		Velocidad desarrollo	0,12	0,01

En esta etapa, el evaluador usa medidas absolutas para calificar la fuerza (MA, muy alto, A, alto, M, medio, B, bajo, MB, muy bajo) [43]. El ranking absoluto es realizado sobre los productos que se utilizan para la elaboración de la línea hombre adulto. En la Tabla 7, se evidencian algunos de los insumos valorizados en la calificación.

La Tabla 8 muestra los pesos normalizados calculados para la escala de cinco puntos usando el procedimiento AHP. La medición absoluta o directa se utiliza porque habrá un número intratable de comparaciones en pares para realizar. Se tienen 20 componentes que deben clasificarse frente a las medidas de la Tabla 7. Esta diferencia crecería rápidamente con aumentos en el número de componentes [43, 44].

**Tabla 7.** Ranking absoluto

Prioridad competitiva	Medidas Prioritarias Competitivas	Telas	Marquilla Cartón Y Cuero	Cremallera	Remache	Etiqueta
Calidad	Durabilidad de componentes	MA	MA	MA	MA	B
	Confiabilidad de componentes	MA	A	A	MA	A
	Innovación de componentes	M	M	M	A	A
Disponibilidad	Flexibilidad de volumen	M	A	M	A	A
	Flexibilidad de modificación	MA	A	A	A	A
	Capacidad tecnológica	A	A	A	A	A
Costo	Costo de compra	MA	M	M	B	B
	Costo de inventario	MA	M	M	B	M
	Costo de calidad	MA	A	A	A	M
Tiempo	Velocidad de entrega	A	A	A	B	M
	Confiabilidad de entrega	A	A	MA	MA	A
	Velocidad desarrollo	B	MB	B	M	M

**Tabla 8.** Matriz de juicio comparativo en pares para la escala de calificación de cinco puntos

Escala de valoración	MA	A	M	B	MB	Peso prioritario	
Muy alto	MA	1	3	5	7	9	0,51
Alto	A	1/3	1	3	5	7	0,26
Medio	M	1/5	1/3	1	3	5	0,13
Bajo	B	1/7	1/5	1/3	1	3	0,06
Muy bajo	MB	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,04
Total		1,79	4,68	9,53	16,33	25,00	1,00

Para cada componente, los resultados obtenidos con la escala de calificación de cinco puntos se multiplican por los pesos globales de los sub-criterios. Este proceso se ilustra en las tablas para los componentes de cada insumo de la empresa. Por ejemplo, el peso global para la durabilidad de los componentes es 0,24 (Tabla 6) y el impacto de las telas en la durabilidad se ha evaluado como muy alto, lo que equivale a un peso de 0,51 (ver Tabla 8).

Por lo tanto, la puntuación para las telas respecto a la durabilidad es 0,1239. La puntuación total para cada componente se normaliza dividiendo por la suma de los puntajes totales en todos los componentes, de modo que suman 1. Observando la Tabla 9, la puntuación total para las telas es 0,3962. La suma de las puntuaciones totales en todos los componentes se calculó como 4,2709. Por lo tanto, la puntuación normalizada las telas 0,0928.

**Tabla 9.** Cálculo de la puntuación global para el Insumo Telas

Telas					
Prioridad competitiva	Medidas prioritarias competitivas	Peso global	Valoración	Peso de la calificación	Peso global x Peso de la calificación
Calidad	Durabilidad de componentes	0,24	MA	0,51	0,1239
	Confiabilidad de componentes	0,21	MA	0,51	0,1083
	Innovación de componentes	0,09	M	0,13	0,0121
Disponibilidad	Flexibilidad de volumen	0,12	M	0,13	0,0150
	flexibilidad de modificación	0,06	MA	0,51	0,0324
	Capacidad tecnológica	0,03	A	0,26	0,0091
Costo	Costo de compra	0,10	MA	0,51	0,0487
	Costo de inventario	0,02	MA	0,51	0,0081
	Costo de calidad	0,03	MA	0,51	0,0162
Tiempo	Velocidad de entrega	0,06	A	0,26	0,0160
	Confiabilidad de entrega	0,02	A	0,26	0,0057
	Velocidad desarrollo	0,01	B	0,06	0,0007
Puntaje total					0,3962
Puntaje normalizado					0,0928

Dado que el AHP se basa en la escala de ponderación de 1 a 9, las puntuaciones de "valor de componente" se transforman en esta escala para la consistencia usando la ecuación (1).

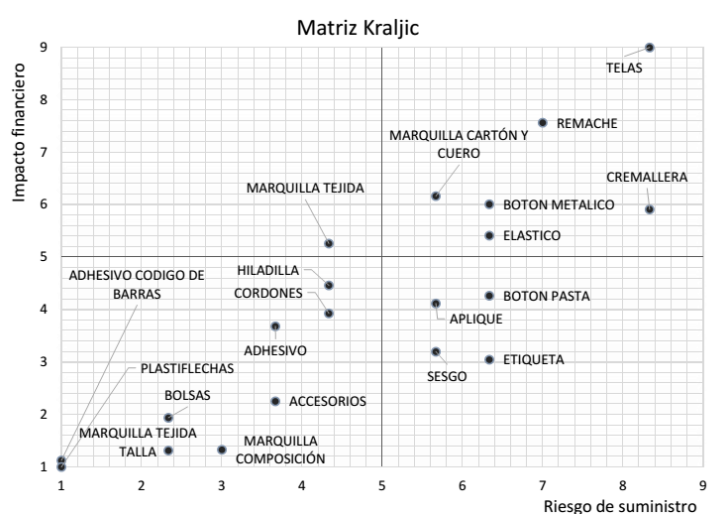
$$Z_i = 8 \left( \frac{Y_i - \min(y)}{\max(y) - \min(y)} \right) + 1 \quad (1)$$

Las puntuaciones escaladas se utilizan para posicionar los componentes en la matriz de la cartera de compras. Donde  $Z_i$  es la puntuación transformada del componente  $i$  (ver Tabla 10);  $Y_i$  es la puntuación normalizada del componente  $i$ ;  $\min(y)$  es la puntuación normalizada mínima en todos los componentes; y  $\max(y)$  es la puntuación normalizada máxima en todos los componentes. Este puntaje se utiliza como 'impacto financiero'. Por último, los componentes se sitúan en la matriz de la cartera de compras utilizando sus calificaciones de 'impacto financiero' y 'riesgo en el mercado de suministro'. Una vez construida la matriz de Kraljic se identifican los tipos de insumos según el cuadrante en el cual quedan ubicados (ver Figura 4).

- Estratégicos: Telas, remache, marquilla cartón y cuero, botón metálico, cremallera, elástico.
- Apalancados: Marquilla tejida.
- Cuellos de botella: Botón pasta, aplique, sesgo, etiqueta.
- Rutinarios: Hiladilla, cordones, adhesivo, accesorios, bolsas, marquilla tejida talla, marquilla composición, adhesivo código de barras, plastiflechas.

**Tabla 10.** Resumen de las puntuaciones normalizadas de riesgo de suministro

Insumo	Puntuación normalizada	Zi (eje Y)
Telas	0,093	9,000
Marquilla cartón y cuero	0,068	6,165
Cremallera	0,066	5,913
Remache	0,080	7,564
Etiqueta	0,041	3,048
Botón metálico	0,067	6,012
Bolsas	0,032	1,938
Cordones	0,049	3,930
Marquilla composición	0,026	1,328
Aplique	0,051	4,119
Botón pasta	0,052	4,265
Sesgo	0,043	3,197
Marquilla tejida	0,060	5,263
Elástico	0,062	5,413
Marquilla tejida talla	0,026	1,314
Adhesivo	0,047	3,682
Adhesivo código de barras	0,025	1,127
Hiladilla	0,054	4,462
Accesorios	0,034	2,254
Plastiflechas	0,024	1,000



**Figura 4.** Matriz de Kraljic para insumos

- **ETAPA 2. Análisis de Mercado de insumos.** Esta etapa consta de las siguientes actividades: Determinación de los rubros que se incluirán en el programa, análisis estadístico a partir de las sumas totales de las magnitudes observadas y registradas, resumen por clases y finalmente, análisis del diagrama de Pareto. La Tabla 11 presenta un resumen de datos según la clasificación ABC. La relación de A significa que el 5% de los rubros son los que representan el 81,82% de los costos de las compras totales para el año en estudio. La razón de importancia absoluta de A es 16,36, observándose mucho mayor que la de B y C, consecuentemente la razón de importancia relativa de A supera ampliamente la de los ítems B y C.

**Tabla 11.** Resumen por clase.

Clasificación de n	Porcentaje rubros dentro de la clase	Participación estimada	Establecer relación	Razón de importancia absoluta	Razón de importancia relativa
A	5%	81,82%	81,82/5	16,36	234,67
B	20%	12,94%	12,94/20	0,65	9,28
C	75%	5,23%	5,23/75	0,07	1,00

En este paso para el desarrollo de esta herramienta, se hace la calificación de cada uno de los grupos de artículos en una escala cualitativa (Alto/Bajo). Los ejes empleados fueron el impacto financiero y el riesgo de abastecimiento. Cheverton y Van der Velde [45] realizan una descripción de los valores que pueden tomar las variables:

- **Riesgo de abastecimiento alto:** Presenta dificultad en tener suficientes proveedores para asegurar un abastecimiento constante.
- **Riesgo de abastecimiento bajo:** Se cuenta con un amplio número de proveedores o son fácilmente intercambiables.
- **Impacto financiero alto:** Representa un gran nivel de ventas perdidas si el ítem no estuviera disponible.
- **Impacto financiero bajo:** No afecta en gran medida los resultados financieros de la compañía.

El riesgo de abastecimiento se refiere a que tan “especial” es el ítem, por lo cual, los que tienen un amplio número de proveedores, o son fácilmente intercambiables, cuentan con un bajo riesgo [45]. En contraste, los que son completamente personalizados y/o patentados tienen un riesgo de abastecimiento superior. Según Ferreira y Kharlamov [46], el enfoque de la cartera considera que la dimensión del impacto financiero (interno) puede ser medido por el costo de materiales/costos totales, el perfil de valor agregado o el perfil de rentabilidad. La organización, a pesar de encontrar el mejor ajuste entre la matriz como herramienta y su realidad, debe seleccionar sus criticidades particulares. Dada una cartera de compras, cada producto puede agruparse respecto a las características de la oferta, y luego calificar en consecuencia, diferentes factores críticos.

Con el objetivo de determinar la calificación correspondiente, se considera la cantidad de proveedores con los que cuenta la compañía para el abastecimiento de cada familia de productos, la importancia del insumo para la prenda final, la calidad y el cumplimiento en los despachos por parte de los proveedores.

- *ETAPA 3: Estrategias de compra.* En la Tabla 12, se muestra la clasificación de los insumos basados en el nivel del impacto financiero y el riesgo de suministro y el tipo de compra que se realiza según dicha categorización.

**Tabla 12.** Tipo de compra y clasificación de productos [8]

Impacto Financiero	Riesgo de Suministro	Clasificación de la Matriz Kraljic	Tipo de Compra
Alto	Alto	Productos Estratégicos	Compras Estratégicas
Alto	Bajo	Productos Apalancados	Compras Pesadas
Bajo	Alto	Productos cuello de botella	Compras arriesgadas
Bajo	Bajo	Productos Rutinarios	Compras Sencillas

Se han definido las siguientes estrategias de compra teniendo en cuenta la ubicación de los insumos en la matriz de Kraljic [12].

- *Cuadrante productos estratégicos*  
Estrategia: Mantener la relación. Descripción de la estrategia: Se debe mantener una relación estratégica con el proveedor considerando el alto riesgo de suministro e impacto financiero sobre el insumo que nos provee. Es importante establecer un contrato a largo plazo donde la relación sea de mutua satisfacción entre ambas partes.
- *Cuadrante productos cuello de botella*  
Estrategia: Mantener niveles seguros de inventario. Descripción de la estrategia: Esta estrategia consiste en asegurar niveles confiables de inventarios a fin de garantizar el suministro continuo del insumo, evitando el riesgo de incumplimiento hacia nuestros clientes por demoras en la producción de sus pedidos. Se debe incrementar la cartera de proveedores para los insumos ubicados en este cuadrante de la matriz.
- *Cuadrante productos de apalancamiento*  
Estrategia: Socio de conveniencia. Descripción de la estrategia: Se debe realizar una licitación competitiva eligiendo proveedores que ofrezcan buenos precios garantizando calidad y tiempos efectivos de entrega. Esto debido al alto valor financiero que tiene el insumo sobre el valor total de la producción. En caso de lograr una relación estratégica con un proveedor a través de un contrato a corto plazo y de posición dominante o de conveniencia para nuestra compañía se debe garantizar que el proveedor es tecnológicamente fuerte y capaz de soportar nuestra demanda de insumos.
- *Cuadrante productos no-críticos*  
Estrategia: Agrupación de requisitos. Descripción de la estrategia: La estrategia de agrupación se realiza mediante la selección de proveedores que ofrezcan insumos ubicados en éste cuadrante con el objetivo de reducir los costos indirectos de compra relacionados con las actividades administrativas (pedidos, facturación y compras). Se debe trasladar el costo de inventario al proveedor y negociar tiempos efectivos de entrega.

### 3.2 Metodología AHP

- *ETAPA 4. Determinar los proveedores.* La construcción de un modelo jerárquico permite al decisor estructurar el problema en forma visual, con la técnica se busca formalizar la comprensión intuitiva de un problema multicriterio complejo [47]. Así mismo, señalan que el primer nivel de la jerarquía es para las áreas más críticas en el abastecimiento global para las cadenas de suministro de textiles y prendas de vestir [48]. Este nivel consta de cinco criterios que incluyen entrega, flexibilidad, costo, calidad y confiabilidad. Utilizando la escala psicométrica de Saaty se propone el nivel de importancia de cada criterio respecto a los demás (Tabla 13).

**Tabla 13.** Evaluación de criterios, matriz AHP

Evaluación criterios	Calidad	Entrega	Confiabilidad	Flexibilidad	Costo
Calidad	1	4	6	7	3
Entrega	1/4	1	3	4	1/2
Confiabilidad	1/6	1/3	1	2	1/3
Flexibilidad	1/7	1/4	1/2	1	1/3
Costo	1/3	2	3	3	1

En la Tabla 14 se muestran como ejemplo, los valores asignados en comparación de los proveedores de botón metálico respecto al criterio de calidad. Para cada insumo, se evalúan los proveedores con respecto a los criterios sugeridos por la literatura.

**Tabla 14.** Matriz de comparación pareada del criterio calidad y los proveedores

Proveedores de botón metálico	Criterio: Calidad				
	Creatum Accesorios	C.I. Estrada Velásquez Y Cía S.A.S	Cimetal	Manufacturas Reymon S.A	Lujo Herrajes S.A.S
	S.A	S.A.S	S.A	S.A	S.A.S
Creatum Accesorios S.A	1	1/3	1/3	3	3
C.I. Estrada Velásquez Y Cía. S.A.S	3	1	1	5	4
Cimetal S.A	3	1	1	4	3
Manufacturas Reymon S.A	1/3	1/5	1/4	1	1
Lujo Herrajes S.A.S	1/3	1/4	1/3	1	1

Los datos de la matriz original sirven para generar la ponderación de los criterios. Estas puntuaciones suministran una medida de la importancia relativa de cada criterio [47]. La matriz de valoración normalizada se determina por la media geométrica de cada fila en las matrices de comparación pareada (ver Tabla 15).

**Tabla 15.** Matriz normalizada de la evaluación de criterios bajo metodología AHP

Normalizada	Calidad	Entrega	Confiabilidad	Flexibilidad	Costo	Peso
Calidad	0,53	0,53	0,44	0,41	0,58	0,50
Entrega	0,13	0,13	0,22	0,24	0,10	0,16
Confiabilidad	0,09	0,04	0,07	0,12	0,06	0,08
Flexibilidad	0,08	0,03	0,04	0,06	0,06	0,05
Costo	0,18	0,26	0,22	0,18	0,19	0,21
<b>CR (Proporción de la consistencia)</b>						<b>0.036</b>

En la Tabla 16 se indican los valores normalizados y el peso obtenido para cada proveedor de botón metálico, con relación al criterio calidad. Este proceso se repite por cada uno de los 5 criterios.

**Tabla 16.** Matriz normalizada proveedores versus el criterio calidad.

Proveedores de botón metálico	Criterio: Calidad					Promedio
	Creatum Accesorios S.A	C.I. Estrada Velásquez Y Cía. S.A.S	Cimetal S.A	Manufacturas Reymon S.A	Lujo Herrajes S.A.S	
Creatum Accesorios S.A	0,13	0,12	0,11	0,21	0,25	0,17
C.I. Estrada Velásquez Y Cía. S.A.S	0,39	0,36	0,34	0,36	0,33	0,36
Cimetal S.A	0,39	0,36	0,34	0,29	0,25	0,33
Manufacturas Reymon S.A	0,043	0,07	0,086	0,071	0,08	0,07
Lujo Herrajes S.A.S	0,043	0,09	0,11	0,071	0,08	0,08
<b>CR (Proporción de consistencia)</b>						<b>0.029</b>

En las Tablas 15 y 16 se observa que la proporción de consistencia tiene valores cercanos a cero (0), indicando que las calificaciones otorgadas son consistentemente aceptables. Finalmente, tras haber realizado las matrices pareadas para cada criterio, se obtienen los puntajes de cada proveedor, como resultado de sumar y multiplicar los pesos obtenidos de cada matriz (ver Tabla 17).

**Tabla 17.** Puntaje obtenido por cada uno de los proveedores de botón metálico.

Proveedores de botón metálico	Calidad	Entrega	Confiabilidad	Flexibilidad	Costo	Puntaje total
Creatum Accesorios S.A.	0,17	0,17	0,25	0,12	0,06	15%
C.I. Estrada Velásquez Y Cía. S.A.S.	0,36	0,24	0,27	0,23	0,13	28%
Cimetal S.A.	0,33	0,39	0,26	0,38	0,28	33%
Manufacturas Reymon S.A.	0,07	0,07	0,07	0,08	0,16	9%
Lujo Herrajes S.A.S.	0,08	0,13	0,15	0,19	0,37	16%
Ponderación	0,50	0,16	0,08	0,05	0,21	1

En el caso de los proveedores de botón metálico, el proveedor más adecuado para el suministro del insumo botón metálico, es Cimetal S.A., obteniendo un puntaje del 33%, el más alto acorde a los requerimientos y prioridades de la compañía.

- **ETAPA 5. Propuesta de indicadores.** Los siguientes indicadores se proponen para la evaluación continua del desempeño de los proveedores seleccionados durante el desarrollo de este trabajo [49].
  - **Calidad:** Cumplimiento de las especificaciones del producto o servicio. Disponibilidad de atendimento y asistencia técnica (bienes y servicios). Calidad en los procesos de implementación y Seguridad (servicios);
  - **Entrega;** Divergencia en la fecha de entrega y Comunicación de los cambios en la fecha de entrada real (bienes y servicios no continuos). Divergencias en la cantidad entregada. Errores en la factura y embalaje adecuado (bienes);
  - **Flexibilidad:** Indicador libre que permite el registro de subindicadores dinámicos. Nuevos requerimientos de flexibilidad son creados cada vez que la empresa solicite alguna modificación de entrega, calidad, pago, etc.

Las diferencias operacionales y culturales entre los sectores y subsectores del departamento de Compras (bienes y servicios) de la compañía en estudio fueron consideradas en la definición de los subindicadores y atributos. De esta manera se permitió que los mismos indicadores sean usados en toda la cadena de abastecimiento de la empresa, manteniendo la homogeneidad y capacidad de comparación, evitando la pérdida de los detalles y particularidades de los procesos específicos de compra. El hecho de no permitir que el análisis agregado de los indicadores sea afectado, facilita la toma de decisiones a nivel gerencial y estratégico [49].

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de la metodología propuesta, identificando la etapa y la actividad. La Tabla 18 contiene los resultados referentes a la etapa 1: clasificación de insumos para la familia seleccionada, y sus 4 actividades correspondientes.

**Tabla 18.** Resultados etapa 1. Clasificación de insumos

Etapa	Actividad	Resultados	
1. Clasificación de insumos	1. Selección de la familia o línea de productos para objeto de estudio	Familia de productos	Porcentaje ventas 2014- 2016
		Hombre Adulto	53,35%
		Dama Adulto	17,79%
		Hombre Bebe	8,54%
		Hombre Junior	8,11%
		Dama Bebe	6,53%
		Dama Junior	5,52%
		Dama Infantil	0,15%
	2. Medición de la dimensión "riesgo de suministro".	Insumo	Impacto financiero
		Telas	8,33
		Cremallera	8,33
		Remache	7
		Etiqueta	6,33
		Botón metálico	6,33
		Botón pasta	6,33
		Elástico	6,33
		Marquilla cartón y cuero	5,67
		Aplique	5,67
		Sesgo	5,67
		Cordones	4,33
		Marquilla tejida	4,33
		Hiladilla	4,33
		Adhesivo	3,67
		Accesorios	3,67
		Marquilla composición	3
		Bolsas	2,33
		Marquilla tejida talla	2,33
		Adhesivo código de barras	1
	Plastiflechas	1	
	3. Medición de la dimensión "impacto financiero".	Insumo	Riesgo de suministro
		Telas	9
		Marquilla cartón y cuero	6,165
		Cremallera	5,913
		Remache	7,564
		Etiqueta	3,048
		Botón metálico	6,012
		Bolsas	1,938
		Cordones	3,93
		Marquilla composición	1,328
		Aplique	4,119
Botón pasta		4,265	
Sesgo		3,197	
Marquilla tejida		5,263	
Elástico		5,413	
Marquilla tejida talla		1,314	
Adhesivo		3,682	
Adhesivo código de barras		1,127	
Hiladilla		4,462	
Accesorios		2,254	
Plastiflechas	1		
4. Ubicar los insumos en la matriz Kraljic.	Cuadrante	Insumo	
	Productos apalancados	Marquilla tejida	
	Productos estratégicos	Telas	
		Remache	
		Marquilla cartón y cuero	
		Cremallera	
		Botón metálico	
	Elástico		

		Hiladilla
		Cordones
		Adhesivo
		Accesorios
	Productos no críticos o rutinarios	Marquilla composición
		Adhesivo código de barras
		Bolsas
		Marquilla tejida talla
		plastiflechas
	Productos cuello de botella	Botón pasta
		Aplique
		Etiqueta
		Sesgo

La Tabla 19, concentra los resultados obtenidos en el desarrollo de la segunda etapa: Análisis de mercadeo de los insumos, dividida en dos actividades.

**Tabla 19.** Análisis de mercado

Etapa	Actividad	Resultados		
2. Análisis de Mercado de insumos para la familia seleccionada	1. Análisis Pareto para Insumos de la línea Hombre Adulto	Clasificación de insumo	Porcentaje rubros dentro de la clase	Participación estimada
		A	5%	81,82%
		B	20%	12,94%
		C	75%	5,23%
	2. Análisis de mercado para cada insumo realizada por el encargado del área de abastecimiento.	Familia de insumos	Impacto financiero	Riesgo de suministro
		Telas	Alto	Alto
		Marquilla Cartón Y Cuero	Alto	Alto
		Cremallera	Alto	Alto
		Remache	Alto	Alto
		Etiqueta	Bajo	Alto
		Botón Metálico	Alto	Alto
		Bolsas	Bajo	Bajo
		Cordones	Bajo	Bajo
		Marquilla Composición	Bajo	Bajo
		Aplique	Bajo	Alto
		Sesgo	Bajo	Alto
		Marquilla Tejida	Alto	Bajo
		Botón Pasta	Bajo	Alto
		Elástico	Alto	Alto
		Marquilla Tejida Talla	Bajo	Bajo
Adhesivo	Bajo	Bajo		
Hiladilla	Bajo	Bajo		
Accesorios	Bajo	Bajo		
Plastiflechas	Bajo	Bajo		
Adhesivo Código De Barras	Bajo	Bajo		

En la Tabla 20 se presenta el tipo de estrategia asociada a la clasificación. Dicha clasificación y estrategia son consistentes con la literatura estudiada para este trabajo.

**Tabla 20.** Estrategia de compra

Etapa	Actividad	Resultados	
3. Estrategias de compra	Mencionar estrategias de compra para los insumos según su clasificación.	Clasificación	Estrategia
		Productos apalancados	Socio de conveniencia
		Productos estratégicos	Mantener la relación estratégica con el proveedor
		Productos no críticos o rutinarios	Agrupación de insumos para un mismo proveedor
		Productos cuello de botella	Mantener niveles seguros de inventario

Los resultados arrojados mediante la aplicación de la metodología AHP para la selección de proveedores de la compañía en estudio, se encuentran especificados en la Tabla 21.

**Tabla 21.** Clasificación de Proveedores

Etapa	Actividad	Resultados		
4. Determinar los proveedores idóneos	1. Desarrollo de la estructura jerárquica (orden)	Seleccionar proveedor idóneo (1)	Criterios (2)	Proveedores (3)
			Calidad	Proveedor 1
			Entrega	Proveedor 2
			Confiabilidad	Proveedor 3
			Flexibilidad	Proveedor 4
		Costo	Proveedor (n)	
	2, 3, 4 y 5 Representación de los juicios de valor, realizar matrices de juicio de valor, matrices normalizadas y comparaciones de las alternativas de los proveedores.	<b>Proveedores Telas</b>	<b>Puntaje total</b>	
		Colombiana de Comercio S.A Corbeta S.A	17,5%	
		Coltejer S.A	17,4%	
		Fabricato S.A	18,0%	

Primatela S.A	13,5%
<b>Proveedores marquilla cartón y cuero</b>	<b>Puntaje total</b>
Creatum Accesorios S.A	28,5%
Etiquetarte S.A.S	17,4%
Finotex S.A	18,4%
<b>Proveedores de cremalleras</b>	<b>Puntaje total</b>
Jen Colombia S.A.S	68,1%
Eka corporación S.A	31,9%
<b>Proveedores de remaches</b>	<b>Puntaje total</b>
C.I. Estrada Velásquez y CIA S.A.S	23,0%
Creatum Accesorios S.A	20,4%
Cimetal S.A	26,2%
<b>Proveedores de etiquetas</b>	<b>Puntaje total</b>
Olaya Palacio Carlos Mario	14,8%
Litocopias Mac S.A.S	15,9%
Tamaprint S.A.S	14,4%
Creatum accesorios S.A	15,4%
<b>Proveedores de botón metálico</b>	<b>Puntaje total</b>
C.I. Estrada Velásquez y Cía. S.A.S	27,6%
Cimetal S.A	32,5%
<b>Proveedores de aplique</b>	<b>Puntaje total</b>
Bordados Colombia S.A.S	37,4%
Be bordados y Estampados S.A.S	25,6%
<b>Proveedores de marquilla tejida</b>	<b>Puntaje total</b>
Olaya palacio Carlos Mario	26,1%
Finotex S.A	27,1%
Marquillas S.A	24,5%
<b>Proveedores de botón pasta</b>	<b>Puntaje total</b>
Botonería limitada la Piacentina	58,9%
Indubotón S.A	41,1%

Finalmente, la Figura 5 presenta los indicadores para el plan de acción, como propuesta para implementación. Esto como finalidad de la realización de la última etapa de la metodología propuesta.

Etapa	Actividad	Resultados
5. Propuesta de indicadores	Actividad única	Indicadores de calidad
		Cumplimiento de las especificaciones de producto (C1)
		$[C1] = \frac{\text{Suma de las puntuaciones por OC del proveedor en el mes}}{\text{Número de OC del proveedor en el mes}}$
		Disponibilidad de atendimento y asistencia técnica (C2)
		$[C2] = \frac{\text{PQR no resueltas por el proveedor durante el mes}}{\text{Número total de PQR realizados al proveedor en el mes}(\%)}$
		Indicadores de entrega
		Divergencia en la fecha de entrega (E1)
		$[E1] = \frac{\text{Entregas realizadas fuera del plazo especificado(mes)}}{\text{Total de entregas recibidas (mes)}}$
		Comunicación de los cambios en la fecha de entrada real (E2)
		$[E2] = \frac{\text{Entregas realizadas fuera del tiempo establecido sin previo aviso a la compañía (mes)}}{\text{Total de entregas recibidas(mes)}}$
		Divergencias en la cantidad entregada (E3)
		$[E3] = \frac{\text{Ítems faltantes de la OC}}{\text{Número total de ítems de la OC} (\%)}$
		Errores en la factura (E4)
		$[E4] = \frac{\text{Facturas erróneas del proveedor (mes)}}{\text{Total facturas generadas (mes)}}$
Embalaje adecuado (E5)		
$[E5] = \frac{\text{Entregas con inconformidad en el embalaje (mes)}}{\text{Total entregas recibidas (mes)}}$		
Indicador de flexibilidad		
$[F1] = \frac{\text{Solicitudes de cambio en la cantidad en las OC no aprobadas por el proveedor (mes)}}{\text{Total de solicitudes realizadas por la empresa al proveedor de cambios en la cantidad de las OC} (\text{mes})}$		

Figura 5. Indicadores propuestos

## 5. CONCLUSIONES

La estrategia propuesta en el departamento de compras de la empresa, por medio de las metodologías kraljic y AHP evidencian que son herramientas eficaces para desarrollar técnicas de compra diferenciadas que estén alineadas con el negocio, dado que las condiciones del mercado en el sector textil han cambiado notablemente en los últimos años, la empresa en estudio se ha visto en la necesidad de realizar ajustes en la relación y cooperación con sus proveedores. Sin embargo, los resultados de esta acción no son del todo satisfactorios y, por tanto, se determina como necesario establecer estrategias para gestionar las compras de la organización. Consecuentemente, es importante establecer



políticas en control de inventarios de los productos, fijar metas en los niveles de stock de producto terminado con el objeto de reducir los plazos de entrega a los clientes; determinar niveles de utilización de la capacidad instalada y formular estrategias de optimización en el abastecimiento de los productos.

El plan de acción propuesto según la literatura, permite evaluar el desempeño de los proveedores con respecto a algunas de las variables más importantes que afectan el riesgo de suministro e impacto financiero. Este plan se apoya en indicadores de gestión diseñados por el grupo de trabajo, no obstante, pueden ser modificados a conveniencia por la compañía para una mayor eficacia en el proceso.

## REFERENCIAS

- [1] Mazo, A., Giraldo, É. & Parra, P. (2015). La evaluación de proveedores en la gestión del abastecimiento en las empresas del sector textil, confección, diseño y moda en Colombia. *Revista politécnica* 7(13), 79-89.
- [2] Van Weele, A. (2010). *Purchasing & supply chain management: analysis, strategy, planning and practice*. Cengage Learning EMEA.
- [3] Gelderman, C. & Van Weele, A. (2005). Purchasing portfolio models: a critique and update. *Journal of Supply Chain Management* 41(3), 19-28.
- [4] Cagliano, R. & Spina, G. (2002). A comparison of practice-performance models between small manufacturers and subcontractors. *International Journal of Operations & Production Management* 22(12), 1367-1388.
- [5] Gadde, L. & Håkansson, H. (2001). *Supply network strategy*. Wiley&Sons.
- [6] Wagner, S. & Johnson, J. (2004). Configuring and managing strategic supplier portfolios. *Industrial Marketing Management* 33(8), 717-730.
- [7] Chen, Y. M., & Huang, P. N. (2007). Bi-negotiation integrated AHP in suppliers selection. *Benchmarking: International Journal* 14(5), 575-593.
- [8] Kraljic, P. (1983). Purchasing must become supply management. *Harvard business review* 61(5), 109-117.
- [9] Villanueva, A. (2011). Estrategias avanzadas de compras y aprovisionamientos: Lean Buying y Outsourcing. *Profit Editorial*.
- [10] Civit, J. (2004). Proceso de Transformación de la función de Compras. *Compras y existencias* (133), 8-11.
- [11] Morelos, J., Fontalvo, T. & Vergara, J. (2013). Application of discriminate analysis to assess the impact of accreditation in health in the profitability indicators in Colombia. *Univ. y Salud* 15(1), 62-71.
- [12] Gelderman, C. & Van Weele, A. (2003). Handling measurement issues and strategic directions in Kraljic's purchasing portfolio model. *Journal of purchasing and supply management* 9(5-6), 207-216.
- [13] Padhi, S., Wagner, S. & Aggarwal, V. (2012). Positioning of commodities using the Kraljic Portfolio Matrix. *Journal of Purchasing and Supply Management* 18(1), 1-8.
- [14] Glöckner, H., Pieters, R. & de Rooij, W. (2005). Importance of the Kraljic matrix as a strategic tool for modern purchasing. *LogForum* 1(1), 1-11.
- [15] Gangurde, S. & Chavan, A. (2016). Benchmarking of purchasing practices using Kraljic approach. *Benchmarking: An International Journal* 23(7), 1751-1779.
- [16] Zhenfeng, Z., Danxia, G., & Liuming, D. (2007). Positioning model of purchasing based on Kraljic's purchasing portfolio matrix and factor analysis. *Globalization Challenge and Management Transformation*.
- [17] Gelderman, C. & Mac Donald, D. (2008). Application of Kraljic's Purchasing Portfolio Matrix in an Undeveloped Logistics Infrastructure: The Staatsolie Suriname Case. *J. Transnatl. Manag.* 13(1), 77-92.
- [18] Glöckner, H., Pieters, R. & Rooij, W. (2005). Importance of the Kraljic matrix as a strategic tool for modern. *LogForum* 1, 1-11.
- [19] Gelderman, C. & Semeijn, J. (2006). Managing the global supply base through purchasing portfolio management. *Journal of Purchasing and Supply Management* 12(4), 209-217.
- [20] Caniels M. & Gelderman, C. (2005). Purchasing strategies in the Kraljic matrix—A power and dependence perspective. *J. Purch. Supply Manag.* 11(2), 141-155.
- [21] Mazo, A., Giraldo, É. & Parra, P. (2015). La evaluación de proveedores en la gestión del abastecimiento en las empresas del sector textil, confección, diseño y moda en Colombia. *Rev. politécnica* 7(13), 79-89.
- [22] Medina, P., Cruz, E. & Gómez, R. (2012). Selección de proveedor de WMS utilizando método AHP. *Scientia Et Technica* 17(52).
- [23] Saaty, T. (1986). Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. *Management science* 32(7), 841-855.
- [24] Mokhtari, M. et al. (2013). Supplier selection in textile industry using fuzzy MADM. *Research journal of applied sciences, engineering and technology* 6(3), 400-411.
- [25] Escobar, W. (2015). Metodología para la toma de decisiones de inversión en portafolio de acciones utilizando la técnica multicriterio AHP. *Contaduría y Adm.* 60(2), 346-366.
- [26] Guerrero, L., Marín, L. & Gómez, J. (2016). Selección multicriterio de aliado estratégico para la operación de carga terrestre. *Estudios Gerenciales* 32(138), 35-43.
- [27] Deshmukh, A. & Chaudhari, A. (2011). A review for supplier selection criteria and methods. Springer.
- [28] Calvi, M. et al. (2010). Cahier de Recherche No. 2010-11 E4. Supplier selection for strategic supplier development. *Ind. Eng.*
- [29] Osorio, J., Arango, D. & Ruales, C. (2011). Selección De Proveedores Usando El Despliegue De La Función De Calidad Difusa. *Rev. EIA* 15(17), 73-83.
- [30] Xu, J. & Yan, F. (2011). A multi-objective decision making model for the vendor selection problem in a bifuzzy environment. *Expert systems with applications* 38(8), 9684-9695.
- [31] Wu, D., Zhang, Y., Wu, D. & Olson, D. (2010). Fuzzy multi-objective programming for supplier selection and risk modeling: A possibility approach. *European Journal of Operational Research* 200(3), 774-787.
- [32] Deng, X. et al. (2014). Supplier selection using AHP methodology extended by D numbers. *Expert Systems with Applications* 41(1), 156-167.
- [33] Hernández, C., López, A. & Pérez, J. (Eds.). (2014). *Managing Complexity: Challenges for Industrial Engineering and Operations Management*. Springer.
- [34] Kilincci, O. & Onal, S. (2011). Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company. *Expert systems with Applications* 38(8), 9656-9664.
- [35] Junior, F., Osiro, L. & Carpinetti, L. (2014). A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing* 21, 194-209.
- [36] Liao, C. et al. (2010). Applying fuzzy-MSGP approach for supplier evaluation and selection in food industry. *African Journal of Agricultural Research* 7(5), 726-740.
- [37] Kou, G. et al. (2012). *Data Processing for the AHP/ANP (Vol. 1)*. Springer.
- [38] Aksoy, A. & Öztürk, N. (2011). Supplier selection and performance evaluation in just-in-time production environments. *Expert systems with applications* 38(5), 6351-6359.

- [39] Lee, D. & Drake, P. (2010). A portfolio model for component purchasing strategy and the case study of two South Korean elevator manufacturers. *International Journal of Production Research* 48(22), 6651-6682.
- [40] Larson, P., Carr, P. & Dhariwal, K. S. (2005). SCM involving small versus large suppliers: relational exchange and electronic communication media. *Journal of supply chain management* 41(1), 18-29.
- [41] Saaty, T. & Vargas, L. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (Vol. 175). Springer.
- [42] Forman, E. & Selly, M. (2001). *Decision by objectives*. World Science.
- [43] Tam, M. & Tummala, V. (2001). An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system. *Omega* 29(2), 171-182.
- [44] Chan, F. & Chan, H. (2004). Development of the supplier selection model: A case study in the advanced technology industry. *Journal of Engineering Manufacture* 218(12), 1807-1824.
- [45] Cheverton, P. & Van der Velde, J. (2010). *Understanding the professional buyer: What every sales professional should know about how the modern buyer thinks and behaves*. Kogan Page Publishers.
- [46] Ferreira, L. & Kharlamov, A. (2012). Application of Kraljic's purchasing portfolio matrix in construction industry—A case study. In: *International Conference of Industrial Engineering and Operations Management*.
- [47] Huamaní, G. (2017). Modelo AHP para seleccionar proveedores de Cloud Computing. *Revista Científica Tecnica* 24(1), 99-106.
- [48] Gary Teng, S. & Jaramillo, H. (2005). A model for evaluation and selection of suppliers in global textile and apparel supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 35(7), 503-523.
- [49] Fernandez, N. et al. (2012). Diseño de sistemas de medición de desempeño de proveedores: Experiencias de un caso de estudio. *Production Journal* 22(1), 43-57.

# Semillero de investigación Sindatronic – Un proceso formativo de desarrollo tecnológico en la Universidad Mariana

Fabio C. Gómez M.<sup>1</sup>  
Jorge A. Chamorro<sup>2</sup>  
Alexandra L. Acosta<sup>3</sup>  
Universidad Mariana  
Pasto – Colombia

El semillero de Investigación Sindatronic de la Universidad Mariana, hace parte del proceso de investigación formativa extraacadémica de los estudiantes de la Universidad Mariana de la ciudad de Pasto, los cuales pertenecen a los programas de Ingeniería Mecatrónica y de la Tecnología en Automatización Electrónica, el semillero fue creado en el año 2010 con el objetivo de Fomentar el espíritu investigativo desde el desarrollo tecnológico, a través de la cooperación interdisciplinaria, despertando el interés en el estudiante de Mecatrónica por el aprendizaje autónomo y formulando soluciones para el bienestar social y empresarial del departamento de Nariño. El proceso formativo e investigativo del semillero Sindatronic en los últimos años se ha caracterizado a nivel regional por la presentación y el desarrollo de proyectos de corte tecnológico, encontrando una solución a los diferentes problemas de los sectores productivos de la región y satisfacer sus necesidades, además de propender por proyectos e Innovaciones que beneficien algunos de los procesos ya establecidos en las empresas y Mypimes del entorno mediante el uso de las últimas tecnologías en electrónica, mecánica y control, la visibilidad de Sindatronic se ve reflejado en las diferentes participaciones locales, nacionales e internacionales.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la investigación y la incorporación de tecnología avanzada, son desafíos a los cuales procesualmente está respondiendo la Universidad Mariana. Considera que en su quehacer institucional son importantes tanto la investigación formativa como la investigación científica. El sector investigativo constituye una de las tres funciones básicas de la Universidad, junto con la docencia y la extensión; según la visión Institucional, las tres deben desarrollarse de manera armónica y equilibrada, posibilitando así su efectiva contribución a la formación integral del ser humano, tanto desde el currículo como desde el ambiente universitario general, para propiciar el desarrollo de procesos internos de crecimiento y realización humana de los miembros de la comunidad universitaria.

La Universidad Mariana en su misión institucional busca “formar profesionales humana y académicamente competentes, con espíritu crítico, sentido ético y compromiso social...” ;[1] estudiantes competentes desde la academia, la investigación y la proyección social, es por eso que una de las estrategias para fomentar estos procesos investigativos, en la universidad se trabaja desde los semilleros de investigación, los cuales están presentes en cada programa académico, con una coordinación institucional centralizada desde el centro de investigaciones.

Dentro de la Universidad Mariana, el proceso formativo de los estudiantes vinculados a los diferentes semilleros de investigación se realiza de forma extracurricular, donde se realiza un trabajo voluntario inicialmente con ganas e intención de aprender y ser parte de esta comunidad buscando fortalecer su conocimiento en la investigación orientada al crecimiento personal, de esta manera los semilleros no solo trabajan en investigación, sino que se busca una integralidad.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La Universidad Mariana se interesa por la apertura de estos espacios alternativos de formación investigativa, porque a partir de los Semilleros de Investigación, constituidos como equipos de trabajo, será posible ir conformando y consolidando la formación de nuevos investigadores. De igual manera dentro del proceso de formación investigativa se demuestra que la investigación puede tener muchos escenarios de aprendizaje alternativo con los tradicionales espacios académicos para que de esta manera se pueda pasar de una situación obligatoria al incentivo en la formación personal y de compromiso social. Los Semilleros de Investigación se constituyen como un medio eficaz para el aprendizaje de la investigación en los estudiantes, y se consideran como una respuesta para incentivar los procesos de formación en investigación en el sistema educativo [2]

Los Semilleros de Investigación en la Universidad Mariana obedecen a la necesidad de responder de manera efectiva a los cambios que impone la cultura científica, como también al avance de una problemática que se ubica en los contextos regionales, nacionales e internacionales y que constituye el punto de llegada de los intentos investigativos en nuestro medio. Es fundamental que los educandos y educadores encuentren espacios propicios para la elaboración de proyectos disciplinarios e interdisciplinarios, como equipos de trabajo, que consolida la formación de nuevos investigadores.

---

<sup>1</sup> fgomez@umariana.edu.co

<sup>2</sup> jchamorro@umariana.edu.co

<sup>3</sup> aluna@umariana.edu.co

Los semilleros de investigación se constituyen en un espacio extraacadémico para el intercambio de ideas y opiniones experiencias investigativas, creando las condiciones favorables, para que el estudiante pueda desencadenar y estimular su curiosidad.

## **2.1 Objetivo**

Fortalecer en los estudiantes el interés, el gusto y la sensibilidad por la investigación, la tecnología y la innovación, explorando la realidad circundante que les permita la construcción de conocimiento y la generación de proyectos investigativos, de emprendimiento y de desarrollo tecnológico para la solución de problemas, dentro de un proceso de reflexión acción; haciendo de la tarea investigativa una actividad cotidiana.

## **2.2 Misión**

En concordancia con la Misión Institucional de la Universidad Mariana, los Semilleros de Investigación fortalecen el espíritu crítico, el sentido ético y el compromiso social de los estudiantes semilleristas y hacen posible la conformación de grupos de trabajo en los cuales la discusión, la concertación, el diálogo de saberes y la interacción con otros grupos y comunidades académicas permiten el planteamiento de soluciones reales a problemas del contexto. Fomentan en la comunidad estudiantil universitaria el gusto por la investigación, el emprendimiento y el desarrollo tecnológico y la innovación. Estos procesos se concretizan en acciones que permiten a los estudiantes de los semilleros su crecimiento en lo personal, en lo profesional y en lo social, a partir de conocimientos y experiencias con voluntad, compromiso y creencia en sí mismos.

## **2.3 Visión**

Los Semilleros de Investigación, como espacios alternativos para la formación investigativa, en el marco de una filosofía humano - cristiana, hacen presencia real y efectiva en los diversos ámbitos del gestionar Institucional y son reconocidos por su interés por la investigación, por su participación activa en los eventos de formación, desarrollo de proyectos de investigación, de emprendimiento y desarrollo tecnológico y por su capacidad de liderazgo manifestada en acciones a favor de la academia y del desarrollo social a nivel regional, nacional y mundial. Se considera importante la articulación de los Semilleros con las demás Universidades en Nodos Departamentales o Redes nacionales e internacionales que constituye un avance en la calidad académica el compromiso y la dedicación de docentes y estudiantes que desean articularse en esta gran tarea de la investigación.

## **2.4 Capacidades a desarrollar**

El Semillero Unimar, como estrategia extracurricular en la Universidad Mariana desarrolla y fortalece las competencias científicas de sus estudiantes, cabe anotar que conjuntamente a la formación investigativa y emprendedora también se desarrollan otras competencias de índole personal y profesional. [3]

- Capacidad de abstracción, análisis y síntesis
- Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica
- Capacidad para organizar y planificar el tiempo
- Conocimientos sobre el área de estudio y la profesión
- Responsabilidad social y compromiso ciudadano
- Capacidad de comunicación oral y escrita
- Capacidad de comunicación en un segundo idioma
- Capacidad para actuar en nuevas situaciones
- Capacidad de investigación
- Capacidad de aprender y actualizarse permanentemente
- Capacidad creativa
- Capacidad crítica y autocrítica
- Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación
- Habilidades para buscar, procesar y analizar información
- Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas
- Capacidad para tomar decisiones
- Capacidad de trabajo en equipo
- Habilidades interpersonales
- Capacidad de motivar y conducir hacia metas comunes
- Compromiso con la preservación del medio ambiente
- Compromiso con su medio socio-cultural
- Valoración y respeto por la diversidad y multiculturalidad
- Habilidad para trabajar en contextos internacionales
- Habilidad para trabajar en forma autónoma

- Capacidad para formular y gestionar proyectos
- Compromiso ético
- Compromiso con la calidad

### 3. SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN UNIVERSIDAD MARIANA

Los Semilleros de investigación de la Universidad Mariana, pertenecen de manera activa a la red colombiana de semilleros de investigación – redcolsi, Nodo Nariño ubicado en el sur occidente del territorio Colombiano, en concordancia al artículo 1 parágrafo 3 de los estatutos de conformación de la Redcolsi que expresa: “Dentro de las Instituciones educativas o de investigación, y en los municipios no capitales de Departamento, los grupos de Semilleros de Investigación podrán organizar Redes locales de semilleros de investigación, precedidos de la denominación “Redcolsi, Nodo... (Nombre del Departamento), Red de Semilleros Investigación de... (Nombre de la Institución o del municipio). Toda Red local o institucional tendrá dependencia y subordinación del Nodo Departamental y estará representada en su organismo de coordinación o dirección departamental.” [4]

El semillero de investigación se constituye en una estrategia pedagógica flexible y dinámica que fundamentada en el trabajo en equipo representa un espacio de discusión, de diálogo, de concertación, de aprendizaje autónomo que promueve la libertad de pensamiento y acción en torno de la Interdisciplinariedad. [5]

Los Semilleros de Investigación son un proceso eficiente para el aprendizaje de la investigación se consideran una respuesta para incentivar los procesos de formación en investigación, dadas las actuales condiciones en el contexto mundial, implicando grandes transformaciones en todos sus órdenes y por ende, también en el sistema educativo, creando nuevos retos a la educación superior y de manera directa en lo referente al campo de la investigación formativa, la ciencia y la tecnología en un clima de gestión universitaria, convirtiéndose en una necesidad real para la apertura de nuevos espacios de reflexión y aprendizaje.

Una de las fortalezas de los semilleros de la Universidad Mariana, es el trabajo bajo un ambiente de aprendizaje donde se investiga investigando, y al ser parte de la RedColsi, los semilleros orientan sus proyectos hacia las diferentes modalidades de participación como es la investigación, el emprendimiento y el desarrollo tecnológico, cada semilleros de la Universidad está definido por una identidad acorde al área de conocimiento de su disciplina, como es el caso del semillero Sindatronic que hace parte del programa de Ingeniería Mecatrónica teniendo sus orígenes en la tecnología en automatización electrónica.[6]

El área del conocimiento del semillero Sindatronic de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Mariana presenta un campo de investigación e innovación en el diseño y desarrollo de sistemas eléctricos, electrónicos y mecánicos a través de proyectos integradores, de automatización, sistematización, manejo de materiales, productos Mecatrónicos, control de procesos productivos y de manufactura, implementación de tecnología, sistemas inteligentes, robótica industrial, diseño y construcción de equipo y maquinaria, innovar algoritmos de inteligencia computacional y robótica con el fin de lograr mayor calidad, eficiencia, precisión, versatilidad, seguridad y competitividad a nivel regional.

Este semillero de investigación Sindatronic de Ingeniería Mecatrónica trabaja desde el año 2010; el cual se ha destacado por su producción tecnológica e innovación, que buscan generar un desarrollo a los sectores productivos y su participación en eventos académicos y científicos a nivel institucional, regional y nacional.

El semillero de investigación se constituyó con el objetivo de realizar proyectos e investigaciones de corte tecnológico los cuales se enfoquen en las necesidades del sector agroindustrial de la región, y se logre un reconocimiento por el trabajo en la generación de maquinaria y equipos productivos, por esta razón los objetivos que se buscan en el semillero son:

- Colaborar con el desarrollo de proyectos tecnológicos de automatización que permitan ofrecer soluciones a problemas reales de la agroindustria nariñense mediante el diseño y la implementación de aplicaciones, maquinaria y equipos que den soluciones ingenieriles teniendo presente la preservación del ambiente.
- Desarrollo de prototipos relacionados con automatización, electrónica y Robótica, con el propósito de aprender el proceso investigativo desde los primeros semestres, teniendo en cuenta la complejidad y el nivel de conocimiento de los estudiantes que ingresan al semillero.
- Generar el deseo y el interés de aprender y de continuar trabajando en estos proyectos integrales, con el apoyo de docentes expertos en temas puntuales de la tecnología, además de fortalecer las labores de investigación del programa basados en la línea general de investigación tanto estudiantil como profesoral del área. El semillero Sindatronic, desarrolla proyectos de desarrollo tecnológico que se articulan a la línea de Investigación profesoral y estudiantil del programa de Ingeniería Mecatrónica. [7]

Una de las estrategias que se trabaja desde el semillero Sindatronic son las visitas empresariales donde empresas pequeñas y medianas locales y empresas grandes nacionales permiten el acceso de los estudiantes del semillero a sus instalaciones productivas, mostrando cual es la realidad del entorno nariñense y nacional, estas visitas permiten que el semillero identifique como se presentan los procesos productivos mediante la interacción en el dialogo con el empresario, la observación y análisis de los sistemas tecnológicos utilizados.

Estas visitas permiten a que los semilleristas de ingeniería Mecatrónica y automatización electrónica comprendan cuáles son esos requerimientos, necesidades, falencias tecnológicas que están en el proceso productivo y de esta manera pueda generar con el apoyo del coordinador de investigación y la asesoría del docente experto en un área del conocimiento de la Mecatrónica, de esta manera se puedan generar propuesta de desarrollo tecnológico fortalecida en el proceso investigativo, la cual se pueda hacer visible en las participaciones de los eventos académicos y científicos.

Esta estrategia que se realiza en el semillero Sindatronic está enmarcada dentro del compilado de acciones formativas que se trabajan con los estudiantes en las fases de formación del semillero de la Universidad Mariana, entre las empresas que se han visitado estos últimos años se pueden destacar empresas ensambladoras de automotores, empresas de alimentos (lácteas, cárnicas, cereales), empresas de bebidas alcohólicas y no alcohólicas, empresas reencauchadoras, empresas de abonos y alimentos para animales, empresa de plásticos, empresas rurales de transformación agroindustrial, empresa de telecomunicaciones, empresas energéticas, empresas de dulces, golosinas, mecatro, empresas de café, curtiembres, plantas de beneficio, empresas de servicios, instituciones educativas tecnológicas, empresas de salsas, conservas y condimentos, empresas hortofrutícolas entre otras.

El proceso de formación de los semilleristas viene acompañado de diversas actividades que se van integrando en las etapas de formación institucionalizadas, con el fin de generar un aprendizaje investigativo integral.

#### 4. MÉTODO

Los semilleros de investigación realizan acciones, bajo diversas estrategias académicas y científicas, que promuevan la libertad de pensamiento y trabajo autónomo, en pro de plantear y ejecutar proyectos de investigación, emprendimiento y desarrollo tecnológico que den soluciones en diversos niveles y contextos empresariales locales. [3]. Estas etapas de formación se las conoce como fases de aprendizaje, entre las que se encuentran las siguientes:

1. Primera fase, en esta fase se trabajan los procesos de identidad de los estudiantes con el semillero, en donde se establece como objetivo, el fortalecimiento del semillero Sindatronic, a través de un proceso organizado de convocatoria en cada uno de los programas al inicio del semestre académico, con el fin de reafirmar y consolidar la identidad del estudiante del semillero. Es en la identidad del semillero, donde los estudiantes generan un sentido de pertenencia hacia el semillero mirando desde una perspectiva familiar, donde se integren con sus objetivos su misión, visión y se logre una buena cohesión entre coordinador y compañeros. Para la construcción de la identidad del Semillero de investigación Sindatronic se debe considerar que la identidad de un semillero de investigación da respuesta a las preguntas de quienes somos, qué somos, de dónde venimos, hacia dónde vamos, sin dejar de lado el concepto de identidad que apunta también a qué queremos ser.
2. La segunda fase de formación investigativa que presenta el semillero Sindatronic se realiza un trabajo de fortalecimiento de las competencias, el cual está orientada por una directriz general para todos los semilleros de la universidad mariana que propone que los semilleristas se fortalezcan en competencias para luego aplicar los métodos del proceso investigativo, de emprendimiento y desarrollo tecnológico, en el ejercicio del desarrollo de proyectos que sean visibles posteriormente en los eventos académicos. El trabajo que se genera en esta fase esta guiado para que el estudiante pueda tener una visión más global de cuáles son las competencias que debe tener un semilleristas y que sea acorde al perfil del mismo, en esta fase se busca en realizar con los semilleristas diferentes actividades como la visita empresarial que antes se mencionaba, trabajos que fortalezcan sus características emprendedoras personales, como el trabajo en equipo, la comunicación asertiva, el liderazgo, la ayuda mutua, el respeto, la planificación, el proceso administrativo, micro trabajo de campo para recopilación de información, la productividad, realización de estudios de mercados, salidas de campo, capacitaciones en manejos de softwares, entre otras. Dentro de las actividades que también se trabajan en esta fase se encuentran:
  - Desarrollar didácticas lúdicas para la enseñanza – aprendizaje de los fundamentos de la investigación, el emprendimiento, la tecnología y la innovación.
  - Programar ejercicios iniciales de investigación, como la lluvia de ideas, la visita a contextos para la identificación de realidades y problemas industriales, entre otras.
  - Participar en los eventos institucional, nodal, nacional e internacional de semilleros de investigación.
  - Implementar talleres para el desarrollo de habilidades comunicativas.

Además de implementar talleres para el desarrollo de habilidades comunicativas de los semilleristas, a través de la coordinación de investigación estudiantil, últimamente se ha presentado una estrategia de realizar talleres interdisciplinarios generando trabajo colaborativo entre programas e integrando procesos de formación entre coordinadores y semilleristas de otros programas; todas estas actividades con el propósito de para garantizar que los estudiantes continúen su formación extracurricular y fortalezcan su formación académica, demostrando en el aula que son de los estudiantes más destacados.

3. En la tercera fase se realiza la aplicación del proceso investigativo, emprendedor y de desarrollo tecnológico, aquí el estudiante que hace parte del semillero Sindatronic, genera las propuestas, los prototipos y los proyectos en las diferentes modalidades, iniciación o propuesta, avance o finalizadas, este trabajo se realiza de manera articulada

con los docentes investigadores. Las áreas temáticas del grupo de investigación y la coordinación del semillero, para que los estudiantes interesados en formular sus proyectos empiecen a desarrollarlos para que se puedan presentar en los diferentes eventos de los cuales puedan participar, ha existido experiencias donde los proyectos al ser una respuesta para una empresa nariñense han sido acogidos por la empresa y logrando su implementación. El objetivo de la fase es conocer y aplicar los métodos del proceso investigativo, de emprendimiento y desarrollo tecnológico en la solución de problemas reales. Actividades Sugeridas en esta fase:

- Asesorar a los semilleristas en la elaboración de los diferentes documentos para la participación en diversos eventos
  - Socializar las líneas de investigación del programa al que pertenezca el semillero.
  - Invitar expertos en los temas de investigación, emprendimiento y desarrollo tecnológico, para compartir experiencias exitosas.
  - Elaborar las propuestas de investigación, emprendimiento y desarrollo tecnológico con base en los formatos de la Redcolsi.
  - Realizar talleres de elaboración, aplicación e interpretación de instrumentos de investigación, entre otros.
4. Para la cuarta fase, etapa en la cual el estudiante que ya ha pasado por un periodo largo en el semillero visibiliza sus competencias adquiridas en el proceso de ser un semillerista mediante publicaciones, integrar proyectos de investigación profesoraes y su participación en eventos externos a la universidad. Actividades sugeridas:
- Publicar las experiencias destacadas del semillero y sus integrantes en los medios de comunicación de la Universidad Mariana y del Nodo Nariño.
  - Participar en convocatorias de investigación, emprendimiento y desarrollo tecnológico
  - Vincular a los semilleristas a grupos de investigación profesoral de acuerdo a perfiles específicos.
  - Motivar la participación de sus semilleristas en las convocatorias de Jóvenes investigadores de Colciencias

## 5. PERFIL DEL ESTUDIANTE

El perfil que se busca tener con el estudiante que hace parte del semillero Sindatronic es:

- Asume los principios y adopta la filosofía de la institución con sentido de pertenencia.
- Tener sentido de pertenencia hacia su disciplina.
- Proponer ideas de investigación y desarrollo tecnológico que reflejen su compromiso social.
- Evidenciar el deseo de aprender por medio de la indagación investigativa e implementación de la tecnología.
- Aplicar los conocimientos disciplinares en la solución de problemas del entorno socioeconómico y productivo.
- Demostrar liderazgo y capacidad de escucha.
- Búsqueda constante de una respuesta a sus interrogantes.
- Tiene la capacidad de asumir retos.
- Es crítico, reflexivo y propositivo frente a la realidad.
- Manifiesta sensibilidad y compromiso social.
- Está en capacidad de adoptar ideas innovadoras.
- Ser buen amigo y poseer facilidad para relacionarse con otros.

## 6. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación que se maneja en el semillero de investigación Sindatronic está articulada con el diseño y desarrollo Mecatrónico, donde sus áreas temáticas y de trabajo de los semilleristas son:

- Automatización y Control. Dentro de esta área se abordarán temáticas relacionadas con los siguientes campos de formación: Maquinaria y equipos, Domótica, Robótica, Mantenimiento, telemática y redes de comunicación industrial.
- Tecnologías en procesos productivos. Dentro de esta área se abordarán temáticas relacionadas con los siguientes campos de formación: Productos Mecatrónicos, agroindustria, innovación, diseño y optimización, energías alternativas y renovables, procesos de manufactura.
- Simulación y Computación. Dentro de esta área se abordarán temáticas relacionadas con los siguientes campos de formación: Sistemas Inteligentes, procesamiento de señales e imágenes, algoritmos genéticos, redes neuronales, desarrollo de software. [8]

## 7. RESULTADOS

En estos últimos años el semillero de investigación Sindatronic ha participado en los diferentes eventos que se realizan a nivel institucional y regional organizados por el nodo Nariño, con una excelente participación de los cuales



en los últimos 8 años se ha obtenido cupos para realizar su participación en los eventos nacionales organizados por el Red colombiana de semilleros de investigación.

De estas participaciones los proyectos que ha presentado el semillero de investigación Sindatronic han tenido calificaciones meritorias y sobresalientes.

En el año 2016, el semillero Sindatronic participo en el XIX Encuentro nacional y XIII Internacional de semilleros de investigación (ENISI 2016), realizado los días 14, 15 y 16 en el mes de octubre en la ciudad de Cúcuta y obtuvo un cupo para representar a la Universidad Mariana, al Nodo Nariño y a la Redcolsi, en el evento internacional que se realizó en México a finales del año 2017, el proyecto que se presento fue en la modalidad de desarrollo tecnológico "Clasificador de lulo Solanum Sp por medio de visión artificial". Donde fue una experiencia exitosa de los estudiantes por hacer una representación de su área de conocimiento a nivel internacional.

## **8. CONCLUSIONES**

Cabe decir que los semilleros de investigación de la universidad mariana son una estrategia incluyente, donde se privilegia a los estudiantes de los primeros semestres, en este caso de primero a cuarto, de tal manera que su interés en formar parte del semillero este motivado por su deseo de aprender a investigar investigando y no, directamente, con la realización de su trabajo de grado como sucede en los semestres superiores.

Se ha hecho conciencia que los Semilleros de Investigación obedecen a la necesidad de responder de manera efectiva a los retos que impone la academia y a la necesidad de contribuir a la solución de los problemas que se vislumbran en los contextos regionales y nacionales. Es fundamental que los educandos encuentren espacios propicios para conocer más a fondo su realidad socio-económica y cultural, que les permitan elaborar proyectos interdisciplinarios y que puedan abordarlos integralmente.

## REFERENCIAS

- [1] Universidad Mariana (2016). [Plan De Desarrollo Institucional](#).
- [2] Unimar (2008). Hacia la formación investigativa. Documento base centro de investigaciones Universidad Mariana.
- [3] Universidad Mariana (2004). Programa: La investigación estudiantil: la formación del espíritu investigativo. Funciones. Componente 3.
- [4] Redcolsi (2004). Estatutos de conformación. Fundación Red colombiana de Semilleros de Investigación
- [5] Universidad de Antioquia (2003). Propuesta de implementación de Semilleros de investigación. Citado por García, R. & Huertas, V. (2003), Implementación de los Semilleros de Investigación en la Universidad Mariana.
- [6] Universidad Mariana (2004). La investigación estudiantil: La formación del espíritu investigativo.
- [7] Sindatronic (2011). Objetivos e identidad del semillero de tecnología en automatización electrónica e ingeniería Mecatrónica.
- [8] Grupo de investigación en mecatronica (2016). Plan estratégico grupo de investigación, línea de investigación GrIM.

# Semillero Steam: Una experiencia de articulación interdisciplinar entre la educación media y superior

Albenis Cortés<sup>1</sup>

Diana Romero<sup>2</sup>

Fundación Universitaria Panamericana  
Bogotá – Colombia

El Semillero Steam busca aportar al desarrollo social y económico del país a través de la promoción de vocaciones en ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas en jóvenes de la facultad de ingeniería de la Fundación Universitaria Panamericana y estudiantes de educación media inscritos en la academia Cisco del Colegio Restrepo Millán (localidad Rafael Uribe Uribe, Bogotá). Para dar respuesta al reto propuesto, se promueve el desarrollo de capacidades en investigación, se suscita la creatividad, se promueve el aprender a aprender y se genera motivación por temas TI, a través de una combinación de metodologías ya conocidas que permitan dar paso a una propia. Es así, como esta propuesta se convierte en una alternativa innovadora de formación en el aula y permite transformar las prácticas tradicionales para dar respuesta a los nuevos desafíos que se plantean en educación. Los resultados del proyecto se presentan desde cuatro ejes: a) desarrollo de habilidades y conocimientos TIC; b) articulación de los conocimientos TIC con la solución de problemas del entorno; c) exploración de nuevas metodologías para promover la creatividad, la autorregulación, la autogestión y el aprender a aprender y d) establecimiento de alianzas de cooperación con entidad externas. Estos ejes han estado acompañados de un ejercicio constante de autoevaluación que nos ha permitido adaptar estrategias que han funcionado en otros contextos a las necesidades propias de nuestro entorno. De igual forma, hemos compartido con otros nuestro conocimiento, así como nuestra experiencia, promoviendo la construcción de comunidades de saberes y prácticas pedagógicas, así como promover el desarrollo personal y profesional de los participantes – estudiantes y docentes-. Como reto para el año 2018, esperamos ampliar nuestro impacto a la comunidad (padres y/o sector productivo), haciendo un análisis de sus necesidades e identificando cómo la tecnología puede contribuir en su solución.

## 1. INTRODUCCIÓN

La ciudad y la tecnología han convergido para dar paso a nuevas formas de concebir el entorno que nos rodea[1]–[3]. Ya no basta con tener un conocimiento básico sobre la tecnología o las ciencias básicas, se hace necesario que estos conocimientos tomen forma a través de propuestas concretas que favorezcan el desarrollo sostenible económico y social de las naciones. Esta comprensión es importante porque nos exige, no limitar nuestro actuar en el aula de clase a la transmisión de un cúmulo de información sin ninguna aplicación concreta; se hace necesario que el conocimiento tome sentido a través de la creatividad, la experimentación y la aplicación del conocimiento en solución de problemas reales. El semillero Steam surge como estrategia pedagógica de apropiación de la ICT (innovación, ciencia y tecnología) en el grupo de investigación de la facultad de ingeniería de la Fundación Universitaria Panamericana, articulada con la academia Cisco de la localidad Rafael Uribe Uribe; las academias Cisco son parte de un proyecto liderado y coordinado desde la Dirección de Ciencias, Tecnologías y Medios educativos de la SED y en ella participan estudiantes de grado noveno, décimo, once y egresados de colegios oficiales.

A través de esta estrategia pedagógica se busca actuar sobre el entorno brindando solución a problemáticas reales, a través de la tecnología. Para ello, se plantearon cuatro ejes de acción: a) desarrollo de capacidades Steam (ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas); orientado al aprender b) identificación de problemas del entorno; orientado al observar para aprender c) nuevas metodologías para promover la creatividad, la indagación, la autorregulación y la autogestión; orientado al aprender a aprender; y d) establecimiento de alianzas de cooperación con entidades externas; orientado al aprender con otros.

En relación con el primer eje, la formación técnica de Cisco es reconocida a nivel mundial por tener un alto potencial en las tasas de incorporación de los jóvenes al mercado laboral. El proyecto desde sus inicios ha apoyado la formación laboral de los jóvenes orientada a la certificación CCNA de Cisco en administración y gestión de redes, al igual que la certificación ComTIA+ orientada al ensamble y mantenimiento de equipos de cómputo; logrando con esto, que nuestros egresados trabajen actualmente en empresas del sector TI con muy buenos resultados y reconocimiento frente a la competencia. En los últimos años, se han adicionado temáticas asociadas a IoT y ciberseguridad, las cuales favorecen que se desarrolle no solo el aspecto técnico, sino que se despierte la curiosidad por el desarrollo de soluciones tecnológicas. Es así, como en este eje, el foco es aprender.

En este panorama, el desarrollo de las competencias específicas del programa Cisco no ha permitido tener un acercamiento a las realidades del entorno donde los estudiantes viven. Es por ello, que surge el segundo eje de acción, en él se busca contextualizar los conocimientos técnicos y brindar alternativas de solución a problemas del entorno apoyados en la tecnología.

---

<sup>1</sup> [albeniscortes@unipanamericana.edu.co](mailto:albeniscortes@unipanamericana.edu.co)

<sup>2</sup> [dianacromero@unipanamericana.edu.co](mailto:dianacromero@unipanamericana.edu.co)

Los jóvenes a los cuales se dirige la academia Cisco son jóvenes entre los 13 y 18 años de edad. Los contenidos teóricos presentes en la plataforma Cisco exigen un alto nivel de lectura, al cual ellos no vienen acostumbrados, y se les dificulta comprender todos los contenidos. Este fenómeno genera desmotivación y deserción. Como instructores, siempre se buscan estrategias que permitan hacer más sencillos los contenidos, sin embargo, la lectura es obligatoria porque se trata de una certificación internacional. Es aquí donde se hace necesario aprovechar la curiosidad y la creatividad, innatas al ser humano, para motivar el desarrollo de nuevas vocaciones. Tradicionalmente, se ha enseñado a encontrar respuesta “correctas” ya sea a través del padre o el profesor y no a hacer buenas preguntas, desaprovechando las potencialidades del aprendizaje activo. Es por ello, que el tercer eje se orienta al aprender a aprender.

Por último, y como cuarto eje, se promueve el trabajar con otros, a través de alianzas de colaboración con Universidades, como es el caso de la Fundación Universitaria Panamericana, de la mano de los jóvenes pertenecientes al semillero Steam de la facultad de ingeniería se brindan oportunidades de crecimiento y mejoramiento de la práctica a partir de la experiencia. La escuela ha estado tradicionalmente separada del mundo real y la tendencia actual, orientarnos a un mundo globalizado nos exige conocer otros contextos y experiencias para poder potenciar una propia y aportar al mejoramiento de lo ya existente.

De esta experiencia, han surgido las siguientes preguntas: ¿cómo desarrollar competencias Steam en los jóvenes de educación media con apoyo de estudiantes de formación superior? ¿Cómo articular conocimientos y habilidades Steam con problemas del entorno para generar propuestas de solución? ¿Cuáles estrategias metodológicas promueven el aprender a aprender para dar respuesta a las tendencias actuales del mundo a través de la educación? ¿Cómo establecer alianzas de cooperación con entidades externas que permitan mejorar continuamente las prácticas? Por lo tanto, a través del Semillero se busca aportar al desarrollo social y económico del país a través de la promoción de vocaciones Steam (Science, Technology, Engineering, Arts, Math) en jóvenes de secundaria y educación superior, a través de ejercicios de aplicación del conocimiento en forma mancomunada. Para lograrlo se han planteado como objetivos específicos:

1. Desarrollar competencias STEAM en los jóvenes participantes del programa Cisco.
2. Identificar estrategias pedagógicas que permitan analizar problemas del contexto y brindar alternativas de solución a partir del uso de la tecnología.
3. Promover la creatividad, la investigación, la autorregulación, la autogestión y el aprender a aprender para dar respuesta a las tendencias actuales en educación y a las necesidades del mundo actual.
4. Explorar las potencialidades que brinda el establecimiento de alianzas de cooperación con entidades externas.

## 2. MARCO TEÓRICO

De acuerdo con los indicadores de la OCDE, en la mayoría de los países que la conforman, los títulos universitarios más populares son en las áreas de negocios, administración o derecho con un 23% en promedio para cada una de las tres disciplinas, en comparación con el 5% en ciencias naturales, estadísticas y matemáticas; 4% en tecnologías de la información y la comunicación; y 17% en ingeniería, manufactura y construcción. El interés en las ciencias, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (Stem) se da por lo general en programas de posgrado, limitando la innovación de los países. La formación en áreas asociadas a la ingeniería (temáticas cercanas al programa de formación de Cisco) se da más a nivel técnico debido a los fuertes vínculos de estos programas con el sector industrial [4].

John William Branch (presidente de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería, Acofi y vicerrector de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín) asegura que, “si bien hay un déficit con la cantidad de ingenieros graduados, la calidad del ingeniero graduado es escasa también”. Y el problema tiene que ver con que los jóvenes ingresan a la universidad con muchas carencias en materias como física, matemática y química [5], esto lo respalda el análisis de resultados de las pruebas saber-pro en educación básica [6] Se estima que el 50% del déficit mencionado se presenta en el sector de las Tecnologías de la Información y la Comunicación TIC. A esto se le suma un estudio en el que se afirma que si todos los proyectos en Latinoamérica entrarán en operación a 2020 (Como la tecnología 5G enfocada en el Internet de las Cosas o IoT por sus siglas en inglés), en Colombia se requerirían cerca de 20.000 profesionales en ingeniería, mientras que cada año salen al mercado laboral apenas 1.000.

De acuerdo con el Informe de Resultados de La Caracterización [7] realizada en a los estudiantes de ocho colegios del departamento de Cundinamarca ubicados en las provincias de Soacha, Magdalena Centro, Sumapaz, Ubaté, Sabana Occidente, Guavio, Sabana Centro y Alto Magdalena, por Edwin Leonardo Méndez Ortiz, Profesional Observatorio de Innovación Social de la Corporación Universitaria Minuto de Dios; se evidencia que se puede conocer y dar a conocer el potencial de los jóvenes estudiantes del país en áreas de ingeniería y tecnología con enfoque en solución de problemas a partir de la práctica y la investigación gracias a la implementación de metodologías Stem para el aprendizaje.

La Tabla 1 muestra algunos de los programas STEM que se desarrollan en países como Estados Unidos, Irlanda, México, España y Latinoamérica.

**Tabla 39.** Programas STEM en el mundo[8]–[15]

País	Responsables	Descripción	Programa	Resultados
Estados Unidos	Estudios Universal	Usando el "saber cómo" (know-how) detrás de sus principales atracciones, estudios Universal permite e aprendizaje de disciplinas Steam.	YourClassroom in motion	Por medio de "YourClassroom in motion" una aplicación Steam, logra transformar sus principales atracciones en un entorno de aprendizaje creativo
Estados Unidos	Iridescent	Por medio de Inteligencia Artificial (AI) Iridescent le apuesta al aprendizaje del estudiante integrando también a su familia.	TheCuriosity Machine AI FamilyChallenge	Partiendo de 30 participantes en el año 2006 en ingeniería, ciencia y robótica, llega a 30487 en el año 2017 integrando también computación y emprendimiento
Irlanda	SteamEducation Ltd.	Filosofía de "niños felices, profesores felices y compañías felices". Involucra a los niños con los docentes y empresas con enfoque en egresados de calidad.	STEAM in a Box	Enfocado a primera infancia, logra más de 2000 niños participes del programa, más de 50 escuelas y más de 35 compañías.
Estados Unidos	StemtoSteam	Acogiendo la iniciativa STEM to STEAM, de la RISD se enfoca promover el cambio de STEM a STEAM	Sesame Street	Logra incorporar las artes a su plan de estudios usando una caricatura para promover la resolución de problemas usando la imaginación y habilidades matemáticas
México	Workshop	El programa busca incluir la ingeniería al plan de estudios el cual ya es fuerte en ciencias, artes y tecnología.	A Schoolfor STEAM inspiration	Desarrollo de pensamiento crítico en estudiantes, habilidades de comunicación asertiva y sentido de pertenencia por la institución.
España	Universidad de Cantabria	En el marco del programa Erasmus, buscan incentivar a los jóvenes de secundaria por medio de otros jóvenes a interesarse en disciplinas STEAM fomentando la creatividad y la motivación por el aprendizaje	KIKS (KidsInspiringKidsfor STEAM)	Integrar STEM Team East (Reino Unido), Universidad de Jyväskylä (Finlandia) y Universidad metropolitana de Budapest (Hungría) formando una comunidad educativa con otros alumnos a nivel local e internacional
España	Proyecta	Busca promover la innovación en el ámbito educativo mejorando la calidad de la enseñanza, formando continuamente a los docentes	Encuentro InspiraTICs	Eventos en comunidad orientados a la innovación docente en aulas de clase
Latinoamérica	Fundación telefónica	Tiene como misión la mejora de oportunidades de desarrollo de las personas a través de proyectos educativos, sociales y culturales adaptados a retos del mundo digital	Transformación de Escuelas en Latinoamérica	Logrando la participación de más de 30.000 personas, pone en marcha el proyecto en más de 60 escuelas de Latinoamérica.

Como se puede apreciar en la identificación de programas STEM en el mundo, esta necesidad de formación está ligada a políticas públicas de desarrollo. En el Marco de Acción de Dakar Educación para Todos se plantean compromisos para disminuir los índices de analfabetismo y la discriminación de entre los géneros; de aquí se extrae que "la calidad del aprendizaje y la adquisición de valores humanos y competencias disten tanto de las aspiraciones y necesidades de los individuos y las sociedades. Se niega a jóvenes y adultos el acceso a las técnicas y conocimientos necesarios para encontrar empleo remunerado y participar plenamente en la sociedad" [16]. Dentro de los compromisos en el Marco de acción de Dakar se encuentra el aprovechar las nuevas tecnologías de la información y la comunicación para contribuir al logro de los objetivos de la Educación para Todos [16] Por lo anterior, esta estrategia contribuye a facilitar el aprendizaje, la aplicación y uso de la ciencia, tecnología e innovación en diferentes grupos sociales. Son programas que buscan mediante un acercamiento pedagógico y participativo fomentar la apropiación del conocimiento y las herramientas para la investigación.

De niños, muchos soñamos con ser científicos, crear, diseñar, construir nuevos objetos, sin embargo, a medida que crecemos la capacidad de asombro y la curiosidad se va transformando por apatía en las aulas. Muchos de nuestros jóvenes en instituciones educativa publicas asisten al colegio sin encontrar un verdadero sentido a lo que aprenden. Este proyecto busca despertar vocaciones STEAM que les permita a los participantes decidir en un futuro cercano si el campo de las ciencias, la tecnología, la ingeniería, la matemática y las artes serán parte de sus opciones de formación

superior y/o laboral. Buscamos potenciar proyectos tecnológicos que brinden alternativas de solución a problemáticas del entorno.

El marco teórico que aporta a la construcción y consolidación de esta propuesta se presenta en la bibliografía, donde se citan en particular artículos y publicaciones autoría propia. La investigación en estos años se ha centrado en: aprendizaje activo [17, 18], desarrollo profesional docente ([19], diseño de escenarios de aprendizaje social [20], estrategias metodológicas [21], innovación educativa [22-24], estrategias pedagógicas y calidad en programas de educación virtual [21] y políticas de incorporación de TIC en educación [25] entre otros.

### 3. ALCANCE DE LA EXPERIENCIA

MinTIC y Computadores para educar (2012) en su informe La Formación de Profesores en TIC. Casos de éxito de Computadores para Educar afirman que “el problema que se está presentando actualmente no es sólo la brecha de acceso o digital, sino la brecha del aprovechamiento de dichas herramientas con un propósito claro: el aumento en la calidad de la educación” [26]. Por ello, y dentro de los desafíos actuales de la educación está el lograr que el estudiante aprenda a aprender y logre desarrollar sus competencias a partir de sus propias necesidades, no solo a partir de lo que el profesor cree que él necesita. El acceso a los cursos en línea ofrecidos por Cisco como parte de su estrategia de responsabilidad social, garantiza que los contenidos a los que acceden nuestros estudiantes son los mismos a los que acceden estudiantes en 170 países del mundo y las prácticas de laboratorio, así como las simulaciones, corresponden a situaciones propias a las que se ven enfrentadas las personas que trabajan en esas áreas.

Es así, como los estudiantes hacen uso de simuladores con PacketTracer, desarrollan laboratorios, acceden a contenidos en línea, realizan ejercicios de gamificación a través de la aplicación Cisco Aspire, programan con Mblock y crean con Arduino. A continuación, se presentan algunas imágenes ilustrativas:

El proyecto en mención es institucional y de ciudad. Esta propuesta articula las academias Cisco de la SED con el semillero Steam de la Fundación Universitaria Panamericana, contando con el apoyo del proyecto Ondas de Colciencias para el año 2017. Este programa se orienta a estudiantes de medias y superior. A continuación, la Tabla 2 presenta un cuadro resumen con las principales temáticas abordadas.

**Tabla 40.** Resumen de los programas de formación en la academia Cisco

CCNA Routing and Switching	Donde se aprenden conceptos básicos y avanzados sobre redes con experiencia práctica y simulaciones para desarrollar sus destrezas.
Introducción a Cybersecurity	Se descubre cómo protegerse en línea y en los medios sociales a la vez que descubre carreras en ciberseguridad
Introducción a IoT	Se enfoca en conocer cómo Internet de las Cosas (IoT) y la transformación digital de la empresa generan nuevo valor y nuevas oportunidades laborales.

Para el caso de articulación con la educación superior, en el año 2017, se desarrolló la implementación de un sistema de voz IP en el colegio Restrepo Millán, donde los estudiantes de la Fundación Universitaria Panamericana realizaban el montaje inicial y los estudiantes de secundaria participaban activamente en la administración de la solución.

Se cuenta con un grupo en Facebook creado para mejorar la comunicación entre todos. Allí se expone información de interés general y los participantes se sienten libre de preguntar ya sea en el muro o por mensaje privado a la docente. Esto ha permitido que ellos sientan que no solo se aprende en el aula de clase, sino que las redes sociales también ayudan en la tarea. Como el uso de las redes puede ser complejo, se identifican potencialidades y dificultades que se pueden llegar a presentar en su uso y se enfatiza en la forma como se debe dar la comunicación en la red, siendo asertiva y basada en el respeto. La URL de acceso es <https://www.facebook.com/groups/798381550313645/> y se encuentra restringido por tema de protección de datos.

### 4. IMPACTO Y RESULTADOS DE LA EXPERIENCIA

La implementación de la propuesta se ha facilitado por el establecimiento de una metodología en su ejecución. Esta metodología toma elementos del método científico a partir de la ruta propuesta desde el proyecto Ondas de Colciencias; y, se conjuga con el pensamiento de diseño, inspirados en el proyecto Designforchange (DFC España). La ruta que proponen estos dos métodos es:

1. Se conformó el Semillero con el grupo de estudiantes Universitarios y de nivel secundaria
2. Se generó una pregunta como punto de partida
3. Se consultaron múltiples fuentes de información para identificar problemáticas
4. Se seleccionó una metodología para abordar la pregunta de investigación realizando el diseño de la trayectoria de indagación
5. Se implementó el proyecto haciendo un recorrido por la trayectoria de indagación
6. Se reflexionó logrando la producción de saber y conocimiento.

Por su parte, el aporte de la metodología de pensamiento de diseño es:

1. Siente
2. Imagina
3. Actúa
4. Comparte
5. Evolucionar a través de la evaluación

Al combinar estas metodologías, surge una propuesta propia, estructurada en cinco etapas a partir de cuatro ejes. Las etapas se describen a continuación a partir de los siguientes ejes: a) Desarrollo de habilidades y conocimientos TIC; b) Articulación de los conocimientos TIC con la solución de problemas del entorno; c) Exploración de nuevas metodologías para promover la creatividad, la autorregulación, la autogestión y el aprender a aprender y d) Exploración y análisis de las potencialidades que conlleva establecer alianzas de cooperación con entidades externas.

- En la primera etapa, se realiza un ejercicio de conceptualización donde el estudiante entrevista a sus familiares y amigos acerca de los problemas del entorno. De aquí se identificaron problemáticas asociadas a la seguridad en sus barrios y comportamientos de matoneo en el colegio. Enlace a audios de las entrevistas realizadas.
- En la segunda etapa, crean alternativas de solución a las problemáticas identificadas apoyados en el componente tecnológico. Para ello, generan prototipos que les permite empezar a soñar para luego materializar.
- En la tercera etapa, se realizan talleres de formación en temáticas propias del sector TI. Para ello, se desarrollaron talleres de programación con Arduino y diseño de prototipos en papel con el fin de acercarlos al concepto de Internet de las cosas. Enlace a fotos de talleres de clase.
- En la cuarta etapa, se busca generar alianzas y formas de trabajar con otros. En el año 2017 el proyecto hizo parte activa del Programa Ondas de Colciencias, participando como expositores en ExpoCiencia y Expotecnología. Se socializó la experiencia a través de uno de los proyectos del IDEP de experiencias pedagógicas y se articuló un proyecto de fin de carrera estudiantes de ingeniería de telecomunicaciones. Como en esta etapa es importante documentar, se registró la experiencia en la página <https://vomohifosi.jimdo.com/>. La experiencia de los años 2009 -2013 se encuentra en este enlace. Se cuenta de igual forma con testimonios en vídeo de la experiencia vivida por diversos actores, actuales ingenieros que participaron en el proyecto de VozIP, estudiantes que participaron en Expociencia, estudiantes actuales, enlace.
- En la quinta etapa se hizo un ejercicio de autoevaluación constante que permitió mejorar las prácticas tanto desde lo pedagógico como desde lo técnico. Enlace a formularios de evaluación.

En el marco metodológico de un proyecto Steam, se aplicó una encuesta en la sesión #1 y en la sesión #5 de los talleres de formación en temas de VozIP, con el objetivo de medir la inclinación hacia las disciplinas ingenieriles o a fines tanto antes como después de los talleres implementados. Allí también se busca analizar cómo pudo cambiar o evolucionar el pensamiento de los jóvenes con quienes se llevaron a cabo las sesiones en ese periodo de tiempo. Adicional, obtener la opinión de ellos acerca del proceso, metodología y contenido de los talleres y, por último, caracterizar la muestra teniendo en cuenta los siguientes aspectos, como resultados se obtuvo:

- La percepción frente a la importancia de las disciplinas Steam para la vida incremento de un 30% en la encuesta inicial a un 80% en la encuesta de salida.
- El interés por disciplinas Steam como opción de vida incremento de un 80% a un 90% entre las encuestas 1 y 2, después de participar en un programa de formación específico en temas de VozIP.
- Las disciplinas Steam como profesión pasó de un 30% a un 25%.
- Por último, al preguntar acerca de qué les gustaría a sus padres que ellos estudien, el 40% manifiestan ciencia, tecnología y matemáticas, el 20% artes, música o diseño, el 30% otro tipo de estudio y el 10% creen que el estudio no es lo suyo.
- El 80% de los estudiantes manifiestan que la orientación vocacional ha sido nula o escasa, lo cual les dificulta tomar decisiones sobre su futuro.

Los aprendizajes alcanzados en esta experiencia son múltiples, donde se articula el ser, el saber y el hacer. A continuación, se presentan los logros identificados por los propios jóvenes a través de una encuesta de percepción que se realizó sobre el proyecto en el año 2017. Los resultados se categorizan a partir del ser, el saber y el hacer:

#### *Desde el ser*

- Responsabilidad frente a su propia formación
- Autorregulación
- El hábito de madrugar y llegar puntual
- Hábito por la lectura
- Ayudar a los compañeros en el desarrollo de laboratorios.
- Incrementar el compromiso por su propia formación
- Explicar a otros
- Autonomía y organización

### *Desde el saber y el hacer*

- Desarrollo de laboratorios de redes simuladas en Packet Tracer
- Comprensión del concepto de ciberseguridad
- Configuración y ensamble de computadoras
- Configuración básica de redes
- Uso de herramientas
- Configuración básica de seguridad
- Técnicas de ataque en temas de seguridad
- Protección de datos

Se socializaron los resultados en mesas de trabajo de proyectos del IDEP, Expociencia y tecnología 2017 y en la sustentación del trabajo de fin de carrera con la Fundación Universitaria Panamericana. Se logró la participación en comunidades lo cual enriquece considerablemente el establecimiento de alianzas con entidades externas.

#### **4.1 Reconocimientos obtenidos**

- Experiencias pedagógicas de investigación, innovación, gestión y redes de maestros y maestras de la ciudad de Bogotá. IDEP.
- Panelista en los encuentros de docentes organizados por el IDEP
- Expositores en Expociencia y expotecnología 2017
- La experiencia ha sido publicada en el Magazín Aula Urbana del Instituto para la investigación educativa y el desarrollo pedagógico

#### **5. CONCLUSIONES DE LA EXPERIENCIA**

- El articular los contenidos propios de las disciplinas Steam en proyectos con impacto real sobre el entorno de los jóvenes, despierta curiosidad y ganas de experimentar, lo cual se ve reflejado en la motivación por aprender a aprender. Las TIC en educación han permitido cambiar prácticas tradicionales y aportar a la autonomía del estudiante promoviendo nuevas experiencias pedagógicas. [17], [20], [24]
- De igual forma, esta dinámica orientada a la motivación a partir de la investigación permite al docente ampliar sus conocimientos y desarrollarse profesionalmente, abordando campos que a veces quedan olvidados en el afán del día a día y del cumplimiento del currículo[19], [22], [24]
- El salir a otros contextos e interactuar con otras personas ha permitido tanto para los estudiantes como para los docentes ampliar su visión de mundo y despertar el interés por continuar desarrollando nuevas prácticas, así como enriquecer las prácticas de otros. Este tipo de actividades permite que tanto estudiantes como docentes se apropien de su práctica y quiera mejorarla constantemente. En este escenario, se ha logrado en los estudiantes actitudes orientadas al aprendizaje activo y la autoformación.
- En relación con la práctica docente, la participación en espacios académicos y la posibilidad de compartir con otros han permitido que iniciativas como las academias Cisco, que en ocasiones se conciben como aisladas, empiecen a consolidarse en proyectos institucionales logrando de esta forma un mayor apoyo y reconocimiento por parte de la comunidad. Es así, como a partir del trabajo desarrollado en el año 2017 las directivas de la institución decidieron incluir la formación específica de Cisco como asignatura optativa dentro del currículo de los estudiantes de grado décimo y once.
- La dificultad en la implementación de este tipo de propuestas se da principalmente por la falta de motivación de los jóvenes y la falta de autonomía que se genera en la escuela.
- La innovación institucional se fortalece al dar sentido a los saberes teóricos propios de la tecnología a través de la articulación con diferentes disciplinas. Esta experiencia ha sido un primer gran paso en la consolidación de una cultura institucional donde la transdisciplinariedad e interdisciplinariedad de las asignaturas en proyectos específicos es posible.



## REFERENCIAS

- [1] Mitchelle, W. (2017). Ciudades Inteligentes. Universidad abierta de Cataluña.
- [2] Güell, F. (2015). Ciudades inteligentes: La mitificación de las nuevas tecnologías como respuesta a los retos de las ciudades contemporáneas. Universidad Politécnica de Madrid
- [3] Moreno, L. & Gutiérrez, A. (2012). Ciudades Inteligentes: Oportunidades para generar soluciones sostenibles. Cintel.
- [4] OCDE (2017). [Panorama de la educación](#). Online [Nov 2017].
- [5] Velasquez, L. (2016). [En Colombia se necesitan 18.000 ingenieros más](#). El Colombiano. Online [Dec 2017].
- [6] DNP (2014). Educación Básica Media. Dirección Nacional de Planeación. Colombia.
- [7] Méndez, E. (2016). Informe de Caracterización proyecto STEM. Parque científico de innovación social.
- [8] Universal Studies (2015). [Your Classroom in Motion: A STEAM App Series](#). Online [Ene 2018].
- [9] Iridescent (2015). [AI Family Change](#). Online [Nov 2017].
- [10] STEAM Education (2015). [STEAM in a Box](#). Online [Dec 2017].
- [11] StemtoSteam (2015). [Sesame Street](#). Online [Dec 2017].
- [12] theWorkshop (2015). [A School for STEAM inspiration](#). Online [Nov 2017].
- [13] Universidad de Cantabria (2017). [KIKS \(Kids Inspiring Kids for STEAM\)](#).
- [14] Proyecta (2017). [Encuentro InspiraTICs](#). Online [Ene 2018].
- [15] Fundación Telefónica (2017). [Transformación de Escuelas en Latinoamérica](#). España.
- [16] Unesco (2000). [Foro Mundial sobre la educación](#).
- [17] Cortés, A. & Cardona, M. (2013). [Elementos pedagógicos a considerar para la generación de un proceso de tutoría virtual eficiente](#). En: XIV Encuentro Internacional Virtual Educa Colombia. Medellín, Colombia.
- [18] Cortés, A. & Parra, J. (2012). Impacto de la implementación de material digital y virtual como apoyo a la educación presencial. En: IV Congreso Iberoamericano de Soporte al Conocimiento con Tecnología SOCOTE. Bucaramanga, Colombia.
- [19] Cortés, A. et al. (2010). La evaluación docente desde el ámbito administrativo. Actualidades Pedagógicas 56, 133-143.
- [20] Cortés, A. (2016). Diseño de escenarios de aprendizaje social: Aportes teóricos para su construcción. Alicante, España.
- [21] Cortés, A. & Cardona, M. (2014). Contribución de las simulaciones como estrategia metodológica. Revista Internacional de Evaluación Y Medición de La Calidad Educativa 1(1), 19-30.
- [22] Cortés, A. (2016). Prácticas innovadoras de integración educativa de TIC que posibilitan el desarrollo profesional docente. Un estudio en Instituciones de niveles básica y media de la ciudad de Bogotá (Col). Universidad Autónoma de Barcelona.
- [23] Cortés, A. (2017). Innovación y TIC en educación ¿La incorporación educativa de las TIC es por sí sola innovación? IOSR Journal of Research&Method in Education 7(4), 75-85.
- [24] Cortés, A. & Cardona, M. (2013). Identificación de nuevos caminos hacia la innovación educativa. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo 10, 1-16.
- [25] Cortés, A. (2017). Políticas públicas para la integración de las TIC en educación. Revista Educación y Ciudad del IDEP 33, 75-85.
- [26] MinTIC & MEN (2012). La Formación de Docentes en TIC. Casos de éxito de Computadores para Educar. Bogotá.

# Procesos de formación académica en ciencia y tecnología aeroespacial. Experiencias de investigación en cohetería experimental con estudiantes de ingeniería en Colombia

Alejandro Urrego P.<sup>1</sup>

Daniela Ramírez<sup>2</sup>

Sebastián Serrato<sup>3</sup>

Fabio A. Rojas M.<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Universidad de San Buenaventura

<sup>4</sup> Universidad de los Andes

Bogotá – Colombia

Este capítulo describe un proyecto de investigación formativa en diseño y construcción de misiones de cohetería experimental, realizado en el ámbito académico colombiano [20]. Este proyecto, busca aplicar e integrar habilidades multidisciplinarias de estudiantes de diferentes ingenierías e instituciones de educación superior (IES), sobre los cimientos del proceso científico y el pensamiento crítico, desarrollando una base ética y científica, además de habilidades de liderazgo y trabajo en equipo, generando una nueva perspectiva de investigación en un ámbito poco explorado en el país, la ciencia y la tecnología aeroespacial. Para dar alcance a este objetivo, se planteó el desarrollo de una misión de cohetería experimental denominada Séneca V-Cohete Ainkaa Alpha como un proyecto pedagógico de formación en ingeniería, que proporciona a un grupo multidisciplinar de estudiantes, el acceso al entorno aeroespacial y la capacidad de experimentación, en el que se plantea el lanzamiento de un cohete con alcance estratosférico (12 km sobre el nivel del mar) diseñado, construido y operado, por estudiantes de pregrado de diferentes disciplinas de la Universidad de San Buenaventura y la Universidad de los Andes. Se describe el diseño y prueba de la misión de lanzamiento, así como las experiencias pedagógicas adquiridas a través del desarrollo de este proyecto.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos dos años, la asociación entre el proyecto de investigación PUA (Proyecto Uniandino Aeroespacial) [27] de la Universidad de los Andes, y el semillero de investigación de asuntos espaciales GIAS, de la Universidad de San Buenaventura [30], ha conducido al desarrollo, construcción y lanzamiento de diferentes vehículos tipo cohete de carácter experimental. La investigación, tiene como objetivo final, el diseño del primer vehículo tipo cohete de alcance estratosférico colombiano, con objetivos de exploración científica y tecnológica a pequeña escala.

Durante los últimos años, los grupos de investigación han desarrollado y fabricado diferentes vehículos experimentales tipo cohete de corto alcance, con los que se han podido validar estudios propulsivos, estructurales e instrumentación realizados hasta llegar a la creación del cohete Ainkaa Alpha, vehículo de tres etapas propulsadas, con una altitud de apogeo (altura máxima de vuelo) estimada de 12 km sobre el nivel del mar, el cual, debido a sus prestaciones técnicas, requiere de medidas operacionales y de seguridad que hasta ahora no habían sido solicitadas en esta clase de proyectos en el territorio nacional [33], generando un reto y planteando una necesidad a ser resuelta inclusive por entidades gubernamentales [13,14].

El objetivo de este proyecto es analizar el desarrollo de una misión académica aeroespacial, realizada en Colombia, implementando un modelo pedagógico de aprendizaje cooperativo durante el diseño de la misión de lanzamiento, y documentando la experiencia de la integración de un grupo de estudiantes de programas de formación profesional diferentes.

## 2. ANTECEDENTES

La idea de cohetes espaciales, inspirada por las utópicas películas de ciencia ficción de Fritz Lang a fines de la década de 1920, atrajo miles de entusiastas de todo el mundo, especialmente en Alemania, Francia, Estados Unidos, la URSS y el Reino Unido, donde se establecieron las primeras organizaciones nacionales e internacionales de astronomía y astronáutica, desarrollando los primeros estudios, misión y pruebas experimentales [10]. En la actualidad sigue existiendo una gran atracción por los temas espaciales; por esta razón alrededor del mundo existen diferentes organizaciones gubernamentales y privadas, encargadas de promover en todas las escalas de la sociedad la investigación y desarrollo en el campo aeroespacial [21].

A nivel académico, existen grupos de investigación alrededor del mundo, que promueven y desarrollan diferentes investigaciones, en convenio con el sector privado e instituciones públicas. Estos proyectos buscan enseñar e inducir a los estudiantes en el mundo aeroespacial, creando conciencia del trabajo en equipo y de la importancia

---

<sup>1</sup> jo-urreg@uniandes.edu.co

<sup>2</sup> daramirez@academia.usbbog.edu.co

<sup>3</sup> jserrato@academia.usbbog.edu.co

<sup>4</sup> farojas@uniandes.edu.co

de tener una participación activa de su educación científica. Entre los proyectos que más se destacan, está el *Grand Challenges Initiative* (GCI), el cual es un esfuerzo conjunto entre las agencias espaciales de Estados Unidos, Noruega, Japón y diferentes universidades de estos países. La GCI, cuenta actualmente con ocho misiones científicas de cohería, las cuales brindan una experiencia de aprendizaje inmersiva a los estudiantes; los equipos interdisciplinarios de universitarios se unen para dar solución a problemas prácticos en el entorno aeroespacial. Los equipos son dirigidos por los propios estudiantes, y son guiados a través de un proceso de autoaprendizaje, promoviendo el ingenio, preparándolos como futuros profesionales prácticos y pensadores críticos [2].

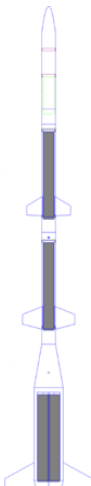
De igual manera, la *Experimental Sounding Rocket Association* (ESRA) es una organización fundada en 2003 en Estados Unidos, cuyo propósito es fomentar y promover el conocimiento en ingeniería y la experiencia en el campo de la cohería. Actualmente la ESRA se centra en los cohetes de alta potencia experimentales o de investigación; por este motivo, organiza una competencia de ingeniería de cohetes (IREC) anual, desde el año 2006. En el 2014 se convirtió en la competencia de cohetes más grande del mundo de nivel universitario. La competencia motiva a los estudiantes a extenderse más allá del aula para diseñar y construir cohetes, aprendiendo a trabajar en equipo, resolviendo problemas del mundo real bajo las mismas presiones de costo, horario y riesgo técnico que experimentarán en el mundo laboral. [16, 29]

En el ámbito latinoamericano, en Brasil, la Universidad Federal de ABC [32] cuenta con el proyecto *UFABC Rocket Design*, el cual está conformado por un equipo de estudiantes que tienen como objetivo proyectar y desarrollar cohetes experimentales. El grupo de investigación ha desarrollado diferentes vehículos de vuelo vertical de corta y alta potencia y han obtenido resultados exitosos, participando en competencias nacionales e internacionales. [18, 31]

En Colombia, la Universidad de los Andes desde el año 2002, desarrolla un proyecto de investigación denominado Proyecto Uniandino Aeroespacial (PUA), en la cual se busca acercar a los alumnos de diferentes ingenierías y en general diferentes carreras profesionales, al ámbito aeroespacial mediante la propuesta y desarrollo de investigación, construcción y ensamble de motores y vehículos tipo cohete, creando una base de conocimientos y de discusión, con el objetivo de desarrollar y permitir el crecimiento de esta actividad en el ámbito nacional. [5, 26]

## 2.1 Configuración del cohete Ainkaa Alpha

El cohete Ainkaa Alpha, misión Séneca V (Figura 1) [28], es producto de un proceso iterativo de diseño e investigación llevado a cabo por estudiantes de pregrado. Construido en fibra de vidrio con una planta motriz de cinco motores en distribución 3-1-1 de separación secuencial [6,18]. Los componentes estructurales se encuentran contruidos en duraluminio y materiales compuestos. Posee un sistema eléctrico que se encarga del control de la ignición de los motores y almacenamiento de información [19], junto con una cámara y sensores encargados de tomar datos en vuelo, como la incidencia lumínica, presión barométrica y geo posicionamiento global [24, 27, 12].



Artículo		Información
Longitud total		289 mm
Diámetro		160 mm (Primea etapa) 76 mm (Segunda y tercera etapa)
Peso equipado		26 kg aprox.
Material		Madera (Nariz) Fibra de vidrio (Fuselaje) Aluminio (Aletas y acoples)
Motores		Kappa Delta Uniandes (x 5)
Propulsor		Candy PUA
Sistema de recuperación	Diámetro	120 mm
	Forma	Octagonal
Primera etapa	Peso equipado	6.35 kg aprox.
	Longitud	1147 mm
Segunda etapa	Peso equipado	4.95 kg aprox.
	Longitud	610 mm
Tercera etapa	Peso equipado	14.6 kg aprox.
	Longitud	986 mm

Figura 44. Características generales del cohete Ainkaa Alpha

## 2.2 Fundamentación pedagógica

De manera conjunta y con el objetivo de desarrollar una misión de lanzamiento, también se encuentra la aplicación de toda la teoría vista a lo largo de cada uno de los programas de pregrado involucrados. Además de la ganancia científica e investigativa, se incluye la experiencia adquirida por los estudiantes ante el desafío de la integración de un grupo multidisciplinar para la construcción y ejecución de una misión aeroespacial de carácter académico en Colombia.

El modelo pedagógico presente en la realización de este proyecto corresponde óptimamente al modelo constructivista (Figura 2), el cual concibe el aprendizaje como resultado de un proceso de construcción personal-

colectiva de los nuevos conocimientos, actitudes y vida, a partir de los ya existentes y en cooperación con los compañeros y el facilitador [4]. El aprendizaje de los estudiantes es activo, participan en las actividades necesarias para la ejecución de la misión, en lugar de permanecer de manera pasiva observando lo que se les explica. En este caso existe una relación entre la teoría, que es aprendida en el salón de clases, la investigación, que parte de la curiosidad que incentiva al estudiante, y la práctica, el espacio en el que es posible poner a prueba todo lo aprendido. Esta combinación de factores también es conocida como aprendizaje cooperativo.



**Figura 2.** Modelo pedagógico constructivista adaptado al desarrollo del proyecto

Kagan [15] afirma que este aprendizaje “se refiere a una serie de estrategias instruccionales que incluyen la interacción cooperativa de estudiante a estudiante, sobre algún tema, como una parte integral del proceso de aprendizaje”. Además, este trabajo cooperativo, con los estudiantes organizados de la manera apropiada según sus fortalezas, genera un dominio del conocimiento generalizado en todos los integrantes [29] característica necesaria para la realización de proyectos en la industria en general, y especialmente en la aeroespacial. De esta manera, la misión de lanzamiento Seneca V corresponde al espacio que se ha dispuesto para los estudiantes de la Universidad de San Buenaventura y la Universidad de los Andes, con la intención de generar este aprendizaje colectivo y fortalecer su formación integral como futuros profesionales del país [8].

### 3. DISEÑO DE LA MISIÓN DE LANZAMIENTO

La experimentación en coherencia requiere llevar a cabo un diseño de todo el proceso que se va a desarrollar durante la misión, abarcando desde lo pertinente al vehículo y su funcionamiento, hasta las medidas de seguridad apropiadas para el personal involucrado. Como resultado, se obtiene una agrupación de actividades técnicas, recursos humanos y financieros, donde interactúan una variedad de disciplinas administrativas e ingenieriles. El desafío para la dupla maestro-estudiante, está en diseñar y desarrollar procedimientos técnicos y administrativos orientados a mejorar la operatividad y maximizar las posibilidades de éxito en la misión, claves para optimizar los tiempos de cierre del espacio aéreo otorgado por la autoridad gubernamental, y evitar retrasos asociados a condiciones ambientales [26,34].

La identificación de los alcances de la misión es una parte fundamental para la planificación de las actividades a desempeñar. En esta fase, cada detalle de la ejecución de la misión es estudiado y analizado entre las partes interesadas, de manera que se establece que la misión académica Seneca V, tendrá como parte de sus objetivos la planificación y desarrollo de las actividades requeridas para un lanzamiento del vehículo exitoso, bajo estrictas condiciones de seguridad [1, 22]. A continuación, se describen cada una de las fases del diseño de la misión.

#### 3.1 Planificación de actividades

El término planificación puede entenderse como la herramienta para resolver el problema de encontrar la asignación temporal óptima de ciertos recursos a determinadas tareas [7,17]. Como parte indispensable en el desarrollo de la misión, es necesario realizar la identificación de las actividades principales requeridas. Para garantizar una organización de acuerdo con las necesidades del proyecto, se desarrollaron modelos de ingeniería de gestión, operación y mantenimiento, los cuales, de manera conjugada, proporcionan un sistema de control y verificación para la ejecución de cada tarea dentro de la misión [9].

Los modelos de ingeniería fueron divididos en tres fases principales: experimentación, entrenamiento y lanzamiento. La triada responde a un modelo que conforma el grupo de actividades de la misión Seneca V, las cuales son agrupadas y vigiladas a través de un mecanismo de autocontrol denominado listas de chequeo (lista de estrictas actividades secuenciales a ser cumplidas en cada etapa del proceso). La Tabla 1 presenta las responsabilidades funcionales de cada modelo para cada fase en el desarrollo de la misión.

#### 3.2 Protocolos de la misión

El desarrollo de los protocolos de seguridad comienza con la definición y evaluación de las características del lanzamiento y los objetivos de seguridad operativos [1]. Luego de realizar un análisis de cada una de las actividades establecidas en la planificación, con base en los lineamientos publicados por la *Tripoli Rocketry Association* para el chequeo pre-vuelo de vehículos de alta potencia [3], se agrupan en orden cronológico y se

obtiene una estructura organizada de toda la misión, donde es posible implementar medidas de seguridad operacional en cada una de las actividades de manera más minuciosa [25]. Las fases en las que se agruparon las actividades se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 1.** Organización de actividades en misión de lanzamiento Séneca V

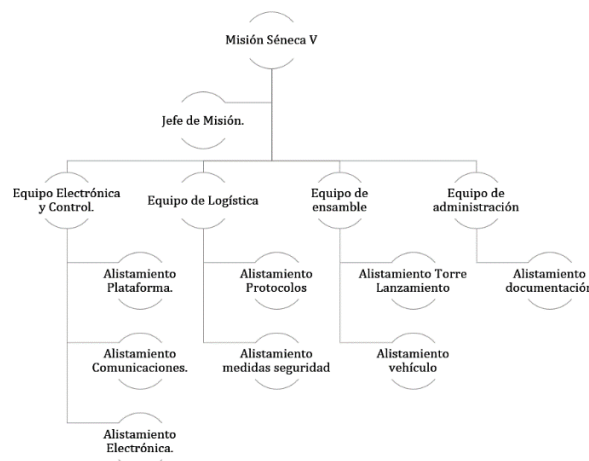
	Gestión	Operaciones	Mantenimiento
Experimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir requisitos de misión.</li> <li>Definir requerimientos logísticos.</li> <li>Identificación de riesgos laborales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planificar y coordinar los parámetros de la misión.</li> <li>Desarrollar procedimientos de lanzamiento.</li> <li>Diseñar requerimientos electrónicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir ls restricciones operacionales del vehículo.</li> <li>Realizar ajustes al vehículo.</li> <li>Identificar y validar los procedimientos realizados.</li> <li>Diseñar los procesos de mantenimiento.</li> </ul>
Entrenamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificar los requerimientos de entrenamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollar el programa de capacitación.</li> <li>Capacitar a los operadores en los sistemas del vehículo.</li> <li>Capacitar a todo el personal de operaciones en los procedimientos y temas de seguridad industrial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Apoyar al desarrollo de contenidos del programa de capacitación.</li> </ul>
Lanzamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Supervisar la gestión de las operaciones.</li> <li>Toma de decisiones relacionadas con el alistamiento y lanzamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toma de decisiones en tiempo real.</li> <li>Coordinar al personal, de acuerdo a la arquitectura de la misión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solución de anomalías previas al vuelo.</li> <li>Validar de operatividad del vehículo basado en las limitaciones de diseño.</li> <li>Diseñar y construir el centro de control de misión en tierra.</li> </ul>

**Tabla 2.** Agrupación de actividades para la determinación de las medidas de seguridad operacional en la misión Séneca V

Fase
1. Personal: determinación de los asistentes al lanzamiento y personal involucrado.
2. Inventario: determinación de los elementos y herramientas requeridos para el desarrollo de la misión.
3. Zona punto cero: alistamiento de seguridad en la zona del lanzamiento y registro de condiciones climáticas.
4. Chequeo de Seguridad: verificación de la integridad y estado del vehículo.
5. Lanzadera: ensamble de la torre de lanzamiento y la primera etapa del cohete.
6. Vehículo en lanzadera: ensamble completo del vehículo e integración de los equipos electrónicos.
7. Lanzamiento: procedimiento de ignición remota del cohete.
8. Recuperación: recolección de los componentes del vehículo y almacenamiento de datos post vuelo.
9. Desmontaje: desensamble de la torre de lanzamiento y desmonte de la zona punto cero.
10. Emergencia: determinación de procedimiento en evento de no encendido, despegue catastrófico o explosión del vehículo.
11. Accidente o Incidente: determinación de procedimientos de reacción ante accidente o incidente ocurrido durante la ejecución de la misión.

### 3.3 Esquema organizacional

Una vez establecidas las actividades principales a desempeñar, se realiza un organigrama Figura 3, donde se incluye todo el personal involucrado en el desarrollo de la misión. El jefe de misión lidera los tres equipos conformados para la ejecución del lanzamiento. En primer lugar, se encuentra el equipo de ensamble, cuyo objetivo es el acople de la torre de lanzamiento con el cohete y su respectivo alistamiento en campo; el equipo de logística coordina el diligenciamiento de las listas de chequeo y de las medidas de seguridad requeridas; el equipo de electrónica y control, es responsable del alistamiento y funcionamiento de los sistemas eléctricos y electrónicos en tierra y los instalados a bordo del cohete, finalmente el equipo de administración, cuya asignación es el oportuno manejo de aspectos documentales y administrativos propios de este tipo de actividades.



**Figura 3.** Organigrama determinado para el desarrollo de la Misión Séneca V

El grupo de asistentes a la misión es conformado por estudiantes de ingeniería aeronáutica, electrónica y mecánica, y docentes de la Universidad de San Buenaventura y la Universidad de los Andes. De esta manera, se culmina el diseño de la misión y se procede con la validación.

### **3.4 Validación de la misión**

Antes del vuelo, y sobre la base de la trayectoria de despegue nominal avalada por el jefe de la misión, se definió un espacio aéreo o corredor de vuelo apto para el lanzamiento. El corredor de vuelo es compatible con los requerimientos de la misión, y asegura que las zonas pobladas próximas al centro de lanzamiento se encuentran seguras, es decir, fuera del rango de influencia del cohete o sus residuos [21].

Debido al objetivo de exploración académica y el alcance estratosférico estimado para el vehículo, se realizó una alianza Estado-Academia, en la cual se solicitó apoyo logístico a la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), indicando que el lanzamiento se realizaría en la base aérea militar de GAORI en el Departamento de Vichada-Colombia, en un punto ubicado en el perímetro rural. [11]. El entrenamiento al personal facilitó la comunicación dentro del equipo multidisciplinario de lanzamiento, utilizando mensajes orales concisos y donde las responsabilidades estaban delegadas al personal correspondiente.

Se utilizaron radios de comunicación para monitorear y transmitir información con el equipo de telemetría instalado en el cohete, a una distancia de tres kilómetros desde el punto de lanzamiento. Adicionalmente, existió una comunicación constante con el personal militar ubicado en la base aérea, el cual tenía la potestad final de autorizar el lanzamiento del vehículo de acuerdo con la meteorología y demás medidas de seguridad pertinentes.

Finalmente, las condiciones climáticas del lugar de lanzamiento dieron lugar a la cancelación del lanzamiento, dadas las variaciones de los valores resistivos inesperados e incontrolados de los elementos ignitores instalados en cada uno de los motores del cohete, dados por las condiciones de humedad ambiental extrema, haciendo insegura la continuación de la misión. Estas condiciones meteorológicas no cambiaron durante un lapso de varias horas obligando a la cancelación del lanzamiento.

### **3.5 Dificultades y facilidades de realizar el proyecto en Colombia**

El proyecto desarrollado, es único en el ámbito nacional, donde la promulgación y desarrollo tecnológico de la cohería, no ha podido tener un crecimiento ascendente, debido a diferentes factores históricos del país. El conflicto armado que ha tenido lugar durante los últimos 50 años, generó que los esfuerzos individuales desarrollados no hayan podido tener un impacto significativo en el país, por tanto, se puede afirmar que Colombia se encuentra aún en las etapas iniciales del desarrollo aeroespacial. [22]

Los proyectos aeroespaciales en Colombia afrontan grandes retos asociados a la infraestructura y las normativas, según expertos, debido a que no existen políticas de estado que permitan convertir la exploración espacial en una oportunidad de desarrollo, tal como lo afirma Jorge Zuluaga, coordinador del programa de Astronomía de la Universidad de Antioquia [35].

El lanzamiento del cohete Ainkaa Alpha, fue realizado en cooperación con el Departamento de Asuntos Espaciales de la Fuerza Aérea Colombiana, el cual dirige actualmente la Comisión Colombiana del Espacio (CCE), encargada de promover y ejecutar la política nacional para el desarrollo y aplicación de las tecnologías espaciales. El lugar dispuesto por la CCE fue una base militar ubicada en zona rural del Departamento de Vichada-Colombia, con relieve de llanura y aislada geográficamente, lo que aseguró que las pruebas se realizaran sin riesgo para terceros. Sin embargo, las condiciones climáticas junto a la nula infraestructura del lugar, influenciaron directamente el curso de la misión.

El desarrollo financiero del proyecto, de igual manera, presentó un rol de gran importancia durante su ejecución, puesto que la investigación en asuntos espaciales es una actividad de alto costo. El desarrollo y fabricación del cohete Ainkaa Alpha desde su inicio contó con un presupuesto ajustado, y en gran parte, los materiales requeridos son de uso restringido en el país o de difícil consecución en el mercado local, siendo necesario recurrir a la importación de los mismos o buscar alternativas económicamente viables.

Hoy en día, la investigación espacial y la tecnología de propulsión cohete, junto al manejo y procesamiento avanzado de datos, pertenecen a las áreas tecnológicas de vanguardia que han abierto nuevas oportunidades técnicas, económicas y sociales en los países modernos e industrializados [10], razón por la cual, se hace indispensable que en Colombia se empiecen a generar las condiciones políticas y sociales que permitan prosperar un mayor número de iniciativas de investigación aeroespacial, y por ende, el desarrollo de tecnologías propias y vanguardistas, proporcionando el ambiente propicio para que los científicos e ingenieros involucrados, logren finalmente realizar las primeras misiones colombianas de exploración del espacio.

## **4. CONCLUSIONES**

Este proyecto se considera un ejercicio educativo, participativo y de capacitación sobre principios de ingeniería mecánica, aeronáutica, electrónica y aeroespacial para estudiantes de pregrado y maestría. Además, es una actividad de alto impacto social y tecnológico, que permite a los estudiantes de ingeniería adquirir conceptos de diseño de

procesos, de logística y metodologías de ensayo, habilidades que son necesarias en el desarrollo y aplicación de sus carreras.

El modelo pedagógico aplicado, además de fortalecer las competencias comunicativas y de trabajo en equipo, resulta innovador al implementar la idea de facultar a los estudiantes con herramientas para innovar y crear, como principio de su educación, con un producto tangible y deseable en la nación como resultado.

La investigación y desarrollo aeroespacial en todos los ámbitos han demostrado ser un medio válido para mejorar la calidad de vida en los países con avances significativos en la materia, por tanto, se puede considerar una herramienta indispensable para el desarrollo del país.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Fuerza Aérea Colombiana-Dirección de Asuntos Espaciales, a la Universidad de San Buenaventura-Bogotá, a la Universidad de los Andes y a la Asociación de Egresados de la Universidad de los Andes-Uniandinos, por su apoyo y disposición, y a todos los patrocinadores del proyecto PUA que apoyaron con sus donaciones, la realización de este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] NASA. (2005). [NASA's Exploration Systems Architecture Study](#). Online [May 2018].
- [2] Andøya Space Center (sf). [Grand Challenge Initiative](#). Online [May 2018].
- [3] Association, T. (2017). [Tripoli Rocketry Association](#). Online [Ene 2018].
- [4] Carretero, M. (1999). *Constructivismo y educación*. Editorial Progreso.
- [5] Ciodaro, G. (2014). Proyecto PUA: Construcción y ensamble del fuselaje para el vehículo Ainkaa Alpha. Trabajo de grado. Universidad de los Andes.
- [6] Crussells, P. (2000). *Cálculo de motores cohete con propulsor sólido*. Madrid.
- [7] Galarza, C. et al. (2017). Design of a candy propellant rocket motor by a computer aided system and its performance in static testing. In: 7th EUCASS Conference.
- [8] [Colciencias](#). Online [May 2018].
- [9] Duque, M. (2011). *Construcción y lanzamiento de un cohete de dos etapas con alcance sub-estratosférico, Misión Séneca II*. Informe Final. Universidad de los Andes.
- [10] European Space Agency (2006). *The History of Sounding Rockets and Their Contribution to European Space Research*. ESA Publications Division.
- [11] FAC (2017). *Pronóstico meteorológico*. Fuerza Aérea Colombiana.
- [12] Ibañez, L., Rincón, M. & Rolón, D. (2016). *Diseño y construcción de una misión de cohería experimental con propelente tipo sólido para alcances estratosféricos*. Trabajo de grado. Universidad de San Buenaventura.
- [13] Jimenez, P. et al. (2016). Multipurpose unmanned aerial vehicle performance and flight dynamics validation Validación de rendimiento y dinámica de vuelo de una aeronave no-tripulada multipropósito. *Actas de Ingeniería* 1, 120–134.
- [14] Jimenez, L. et al. (2017) *Diseño, análisis y validación de aeronaves no tripuladas multipropósito*. Editorial Bonaventuriana.
- [15] Kagan, S. (1994). *Cooperative Learning*. Kagan Cooperative Learning.
- [16] Kornuta, J. & Guo, S. (2012). Rocket Nozzle Payload Design for High Altitude Student Platform. *International Journal of Mechanical Engineering Education* 36(3), 235-247.
- [17] Lawler, E. et al. (1993). Sequencing and scheduling: algorithms and complexity. *Handbooks in Operations Research and Management Science* 9(4), 36-48.
- [18] Mason, L., Devan, L. & Moore, F. (1981). *Aerodynamics Design Manual for Tactical Weapons*. NSWC.
- [19] Mattingly, J. (2006). *Elements of propulsion: Gas turbine and Rockets*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
- [20] NASA (1993). *Safety standard for explosives, propellants, and pyrotechnics*. Office of Safety and Mission Assurance.
- [21] Sutton, P. & Biblarz, O. (2001). *Rocket Propulsion Elements*. John Wiley & Sons.
- [22] Bolívar, P. & Sabogal, A. (2011). *Más que un sueño, una realidad*. Historia Preliminar de la cohería en Colombia. Asociación Astronáutica Colombiana Astcol.
- [23] Ramírez, D. & Rios, I. (2017). *Alistamiento, puesta a punto y lanzamiento de un cohete multietapa de propelente sólido con alcances estratosféricos*. Trabajo de grado. Universidad de San Buenaventura.
- [24] Rincón A. et al. (2016). Sistema de control simulado para mantener la trayectoria de un cohete balístico atmosférico no- teledirigido. *Actas de Ingeniería* 2, 135–142.
- [25] Rockets, A. (2017). *Rocksim V 9*. Simulador cohería experimental. Apogee Rockets.
- [26] Rojas, F. (2017). [Proyecto Uniandino Aeroespacial](#). Online [May 2018].
- [27] Serrato, J. & Ramírez, D. (2017). *Ensamble, puesta a punto y lanzamiento del cohete multietapa ainkaa alpha de alcance estratosférico*. Trabajo de grado. Universidad de San Buenaventura.
- [28] Slavin, R. (1999). *Aprendizaje cooperativo: teoría, investigación y práctica*. Aique.
- [29] The Experimental Sounding Rocket Association (sf). [ESRA](#). Online [May 2018].
- [30] Universidad de San Buenaventura. GIAS, (2016). [Semillero GIAS Colombia](#). Online [Mayo 2018]
- [31] UFABC Rocket design (sf). [UFABC Rocket design](#). Online [May 2018].
- [32] Victoria, O. (2012). *Misión Séneca III: Lanzamiento de un cohete balístico multietapa con combustible tipo candy*. Proyecto de grado. Universidad de los Andes.
- [33] Yuanwen, C. et al. (2013). Integrated Design and Implementation of Ground Test Launch and Control System of Advanced Upper Stage for New Generation Launch Vehicle. In: 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments.
- [34] El País (2016). [Colombia, muy lejos de la órbita espacial](#). Online [May 2018].



# Robot operado con aplicación móvil ROCA: Prototipo de robot teledirigido

Jeimy R. Sosa G.<sup>1</sup>  
Camila A. Gutiérrez L.<sup>2</sup>  
Giovanny A. Piedrahita S.<sup>3</sup>  
Politécnico Grancolombiano  
Bogotá – Colombia

La Corporación Unificada Nacional – CUN, desde hace tres años ha venido haciendo concursos de robótica con el fin de llevar a los ganadores al concurso Mercury Robotics Challenge que se realiza en Estados Unidos. Con el propósito de participar en este concurso y representar a nuestra universidad Politécnico Grancolombiano, se desarrolló un proyecto de un carro robótico controlado vía Wifi, que puede ser operado vía remota. Para la finalidad del concurso el carro debía ser operado a una distancia superior a 80 km, también debía recorrer una pista pasando por un túnel y un puente con la finalidad de recoger y transportar unas cargas hasta la zona de descargue.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo es basado en un proceso realizado para el desarrollo de un artefacto con el fin de participar en el concurso Mercury Robotis Challenge, competencia realizada por la CUN (Corporación Unificada Nacional), dicha competencia es realizada anualmente y este año se llevó acabo la tercera versión para países latinoamericanos; en las tres versiones de esta competencia para países latinoamericanos sus participantes deben presentar un robot que sea operado a distancia, es decir, teledirigido el cual debe recorrer una pista y superar obstáculos.

Lo que nos motivó a participar en esta competencia realizada en abril pasado fue nuestro deseo de mejorar las representaciones de nuestra universidad (Politécnico Grancolombiano) en las versiones anteriores del concurso y el reto que generaba el concurso debido a que no teníamos idea de ¿cómo programar un robot?, ¿Cómo hacer que se moviera? lo que hizo que el concurso fuera una oportunidad de aprendizaje y una manera de poner en práctica el conocimiento que estábamos empezando a adquirir en un énfasis profesional que cursábamos llamado introducción a la Robótica uniéndolo con nuestra carrera Ingeniería de Sistemas en donde reforzamos nuestro conocimiento en Android Studio para programar la interfaz gráfica y también se aprendió a utilizar una nueva tecnología como lo es la tarjeta IOIO que se explicara más adelante.

El desarrollo del presente proyecto conto con el apoyo del semillero en redes y seguridad de la información de nuestra universidad en el cual se indago cual era la mejor forma de lograr una buena y rápida comunicación para operar el robot desarrollado. Para realizar una propuesta de solución al concurso presentado por la CUN es necesario consultar los antecedentes, las diferentes restricciones dadas por el concurso previamente mencionado y como consecuencia se explicará la solución definida y sus detalles (hardware y software). Es estrictamente necesario conocer el funcionamiento del robot en su totalidad, por lo tanto, se realizan pruebas para detallarlo, se construye una sugerencia gráfica dirigida a la mejora del proyecto y se presentan las conclusiones de este.

## 2. EQUIPO

### 2.1 Hardware

El núcleo del robot era el módulo Raspberry, el cual recibía todas las órdenes de la persona que manipula el robot y las transformaba en señales digitales para controlar diferentes partes del robot, como los voltajes aplicados a los motores, lo cual se reflejó en el movimiento del robot. Del módulo Raspberry se desprendían todas las demás conexiones vitales del robot, tales como la cámara, el módulo WIFI para la comunicación del controlador del robot (Cliente), el ejecutor de instrucciones y microprocesador Raspberry (Servidor) y los motores para el movimiento del carro, anteceditos por los puentes H y los transistores; la composición del hardware se muestra en Figura 1.

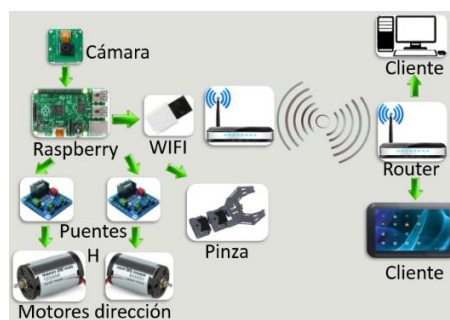


Figura 1. Integración del montaje físico

<sup>1</sup> jrsosago@poligran.edu.co

<sup>2</sup> cagutierrez2@poligran.edu.co

<sup>3</sup> gapiedrahita@poligran.edu.co

## 2.2 Software

El módulo de Raspberry tenía montado un sistema operativo Linux Debian versión Jessie y sobre este, se encontraba alojada toda la aplicación, la cual era consumida por algún cliente el cual se conectaba, mediante una página web, al módulo Raspberry, el cual tenía la función de un servidor WEB; la descripción del software utilizado se representa gráficamente en la Figura 2.

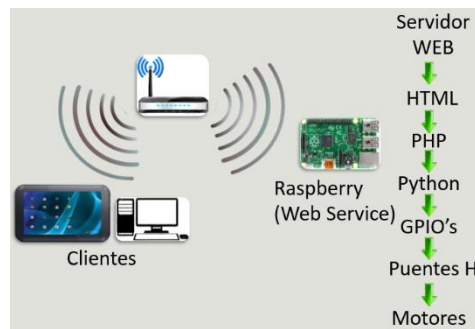


Figura 2. Comunicación de la aplicación

## 3. RESTRICCIONES

Las restricciones de la solución a desarrollar dadas por el comité organizador del concurso Mercury Robotics Challenge Latinoamérica 2018 eran:

- Pista de 61 centímetros de ancho.
- Pista con paredes de 8 centímetros de alto.
- Pista con piso en alfombra.
- Zona de carga con dimensiones de 61 centímetros por 61 centímetros.
- Cargas: circular y cuadrada de dimensiones 2.54 centímetros por 10 centímetros y 2.23 centímetros por 10 centímetros, respectivamente, ver Figura 3.
- Un túnel de madera con forma de L con 30 centímetros de alto y 46 centímetros de ancho con visibilidad limitada.
- Puente de 61 centímetros de ancho, sin paredes limitantes, con ángulos de subida y bajada de 30° y altura de 30 centímetros.
- Zona de zigzag o slalon con paredes de 8 centímetros.
- Sprint: Zona en línea recta con longitud de 10 metros y es la etapa final de la pista.
- Tiempo de operación de 15 minutos una vez el equipo se encuentra en el inicio de la pista distribuidos así: 5 minutos de operación para establecer la conexión con el piloto y 10 minutos para recorrer la pista en su totalidad.
- Cada equipo cuenta con máximo 3 oportunidades para recorrer la pista en caso de que el tiempo lo permita.

La pista descrita anteriormente se puede ver en la Figura 4.

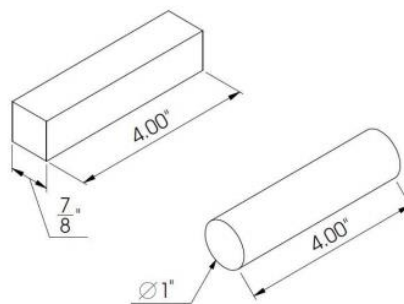


Figura 3. Cargas a ser transportadas

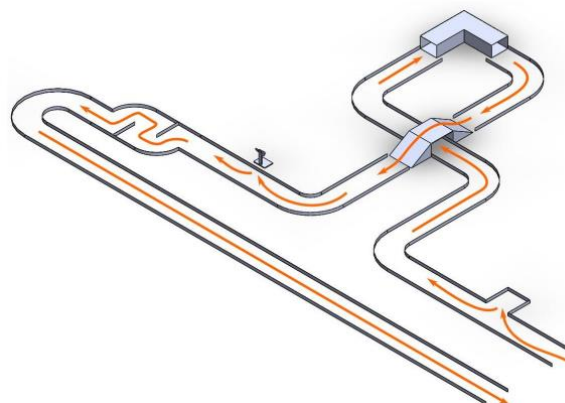


Figura 4. Pista a ser recorrida

## 4. SOLUCIÓN

Partiendo de que el problema es ¿Cómo aplicar el conocimiento adquirido en la asignatura de Introducción a la robótica para resolver el reto propuesto por el Desafío Mercury Latino Robot Challenge? Se escogió un carro con una composición de tres ruedas, dos ruedas traseras por la facilidad de maniobrabilidad en el circuito a recorrer y una rueda loca delantera, para la estabilidad de este, también tiene LEDs que son usados para iluminación de la pista al momento de que el robot ingresa al túnel. Este robot, debe tener una pinza frontal, para recoger la carga, transportarla y descargarla en un lugar específico. Debido a que el carro debía ser manipulado a una gran distancia, decidimos utilizar la conexión WiFi que posee el celular para poder general ese control remoto.

Adicionalmente, como se va a maniobrar a una distancia tan elevada, es necesario que la persona que manipula el carro pueda saber a tiempo real, la posición del carro y de su entorno; para esto se integró al robot un celular el cual tenía la funcionalidad de cámara que transmitía por medio de Skype la sección frontal del carro en tiempo real a la persona que está manipulando dicho robot. Se seleccionó la opción de crear el funcionamiento del robot como un servicio, ya que en el momento en que la aplicación del operador realizaba la llamada a Skype, la aplicación del operador pasaba a segundo plano y no permitía la manipulación del robot; al poner el funcionamiento como un servicio, se aseguraba que siempre existía comunicación entre la aplicación del operador y la del piloto.

### 4.1 Materiales

Para la realización del carro robótico, descrito anteriormente en la sección “INTRODUCCIÓN”, se necesitaron los siguientes materiales:

- Módulo IOIO (Extensión de pines de entrada y salida para el celular, el cual se describirá a más detalle en la sección “MONTAJE DEL SOFTWARE”).
- Fuente externa, que es conformada por 4 baterías AA de 1.2 Voltios, para el módulo IOIO y el celular.
- Celular Smartphone con Cámara y conexión a WIFI.
- Dos motores de corriente directa, para controlar cada llanta del carro robótico a manipular.
- Tres llantas, una por cada motor y otra adicional para la estabilidad del carro, descrito anteriormente.
- Un integrado de puente H (Referencia L298N), este integrado sirve como inversor de voltaje en los motores, lo cual se usa para la reversa del carro (regulador de voltaje) y nos sirve para amplificar el voltaje entregado a los motores, teniendo como entrada de voltaje una fuente externa (una batería de 7.4 Voltios).
- Pinza, la cual es de acrílico y es manipulada por cuatro servomotores, tres para el movimiento del brazo que sostiene la pinza y otro para controlar la apertura-cierre de la pinza.
- Base del carro en acrílico que contiene todos los elementos del carro, tales como las fuentes de alimentación, puente H, motor, etc.

### 4.2 Hardware

El núcleo del robot son las aplicaciones encargadas de enviar y recibir los datos de la base de datos enviados al módulo IOIO, el cual recibe todas las órdenes de la persona que manipula el robot y las transforma en voltajes ejercidos por los motores y pulsos para los servomotores, lo cual se refleja en el movimiento del robot; en la Figura 5 se puede ver el diagrama de conexión anteriormente descrito. Como se puede ver en la Figura 6, del módulo IOIO se desprenden todas las demás conexiones vitales del robot, tales como los motores para el movimiento del carro, anteceditos por el puente H y los servomotores del brazo.

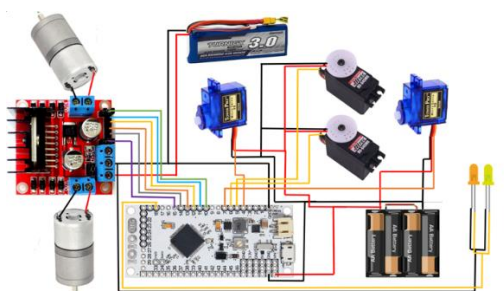


Figura 5. Diagrama conexión montaje físico

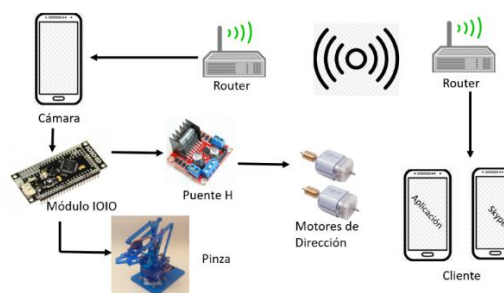


Figura 6. Integración montaje físico

### 4.3 Software

Se tienen dos (2) aplicaciones móviles encargadas de realizar la conexión, enviar los datos a la base de datos y recibir de esta misma, la cual está en FireBase.

1. *Requerimientos funcionales.* El robot planteado para esta propuesta cumplirá con los siguientes objetivos:
  - Desplazamiento sobre la pista: Se usará un carro con tres ruedas para recorrer la pista. Dicho carro podrá ser manipulado por el usuario de forma manual para superar los diferentes segmentos de la pista.
  - Control remoto del robot: Se podrá controlar desde cualquier dispositivo que pueda acceder a Internet y cuente con la aplicación que contiene la interfaz del piloto.
  - Transporte de carga: Tendrá una pinza la cual podrá atrapar y soltar la carga, además tendrá el movimiento de la articulación del brazo que sostiene la pinza del robot, para mayor estabilidad, mientras se transporta dicha carga a su destino.
  - Visualización a tiempo-real: Para esto se usará una cámara de celular que transmitirá la visualización frontal del carro.
2. *Requerimientos no-funcionales.* Entre las características de la aplicación a nivel de calidad se encuentran las siguientes:
  - Usabilidad aplicación: La aplicación creada para el control del carro, tendrá la característica de ser intuitiva al usarla.
  - Mantenibilidad funcionalidades: Si se requiere realizar algún ajuste de alguna funcionalidad del robot o se desea integrar alguna nueva funcionalidad, sea muy fácil de acoplar, debido al re-uso de funciones, arquitectura de software simple, lenguajes de programación de alto nivel modernos y diseño de hardware simple.
  - Disponibilidad: Debido a que los datos estarán disponibles en una base de datos en la plataforma de FireBase, se encuentran disponibles todo el tiempo mientras haya una conexión a Internet.
3. *Aplicación del piloto.* La aplicación Android que usa el usuario, cumple con todos los requerimientos descritos anteriormente, la interfaz cuenta con una serie de botones que permite la manipulación de todas las funcionalidades del robot. Ver Figura 7.

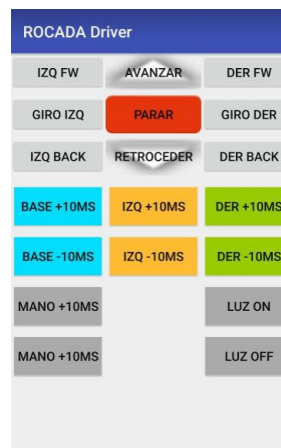
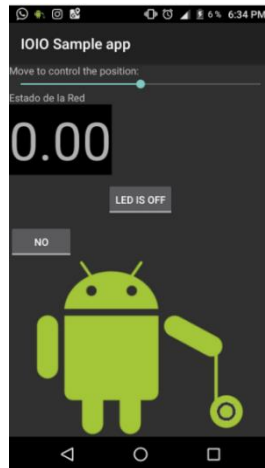


Figura 3. Aplicación Conductor

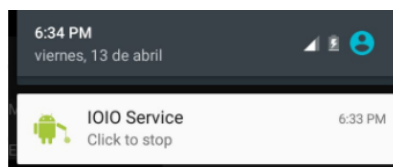
- IZQ FW, el carro gira levemente hacia la izquierda
- AVANZAR, el carro avanza hacia adelante
- DER FW, el carro gira levemente hacia la derecha
- GIRO IZQ, el carro gira completamente sobre su propio eje hacia la izquierda
- PARAR, el carro se detiene
- GIRO DER, el carro gira completamente sobre su propio eje hacia la derecha
- IZQ BACK, este comando es el contrario a IZQ FW
- RETROCEDER, el carro avanza hacia atrás
- DER BACK, este comando es el contrario a DER FW
- BASE + 10 MS / BASE - 10 MS, aumenta o disminuye el pulso enviado al servomotor, el cual mueve la base del brazo.
- IZQ + 10 MS / IZQ - 10 MS, aumenta o disminuye el pulso enviado al servomotor, el cual contribuye al movimiento del brazo
- DER+ 10 MS / DER - 10 MS, aumenta o disminuye el pulso enviado al servomotor, el cual contribuye al movimiento del brazo
- MANO + 10 MS / MANO - 10 MS, aumenta o disminuye el pulso enviado al servomotor, el cual contribuye al movimiento de la pinza
- LUZ ON, enciende los LEDs
- LUZ OFF, apaga los LEDs

Además, el piloto debe contar con otro celular que tenga descargado Skype, para que la aplicación del operador pueda hacer la llamada y usar la cámara del celular para poder visualizar la parte delantera del robot.

4. *Aplicación del operador.* Es una aplicación de Android que identifica si hay una conexión a la red, realiza la llamada a Skype a un usuario específico, permite la lectura de los datos de FireBase y envía las instrucciones a los pines de la tarjeta IOIO para las instrucciones a seguir del robot; en la Figura 8 se muestra la interfaz gráfica de la aplicación del operador. Al momento de conectar el celular a la tarjeta IOIO debe aparecer la notificación de que se conectó como se muestra en la Figura 9.



**Figura 8.** Aplicación del operador



**Figura 9:** Notificación conexión tarjeta IOIO

#### 4.4 Arquitectura

Se utilizó una arquitectura Cliente-Servidor, en el cual participan las dos aplicaciones la del operador y la del conductor; las cuales intercambian información por la base de Datos FireBase lo que permite que la aplicación del conductor envíe instrucciones a la aplicación del operador que a su vez le pasa esta información a la tarjeta IOIO como salidas digitales y pulsos consiguiendo así que se mueva el carro remotamente.

#### 4.5 Conexión inalámbrica

Como se ha descrito anteriormente, se realiza una conexión inalámbrica vía Wifi. La tarjeta IOIO estará conectada al celular el cual se conecta a la red, los datos son almacenados y actualizados en la base de datos FireBase para que se puedan acceder sin problema, desde la otra aplicación que requiera manipular el carro. En este caso los dos celulares utilizados (celular del operador o celular del carro, celular del Conductor y celular o tableta para realizar vídeo llamada conductor) son emisores-receptores ya que reciben y envían la información a FireBase.

### 5. PRUEBAS

Se realizaron pruebas de tiempo de respuesta del Robot con la aplicación del conductor de una distancia cercana y una lejana, con conexión externa de Skype y sin la misma los resultados se pueden observar en la Tabla 1, como se explicó anteriormente la aplicación del operador hace la llamada a Skype y recibe los datos enviados por la aplicación del conductor.

**Tabla 41.** Tiempos de respuesta carro

Distancia	Conexión Skype	Tiempo de Respuesta
Cerca	No	0.6 segundos
Lejos	No	1.3 segundos
Cerca	Si	1.6 segundos
Lejos	Si	2.3 segundos

### 6. REFINAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

#### 6.1 Mockup aplicación conductor

Se realiza este Mockup con el objetivo que la interfaz de usuario de la aplicación del conductor sea más intuitiva, este se muestra en la Figura 10 y se describe la funcionalidad de cada componente en la Tabla 2.

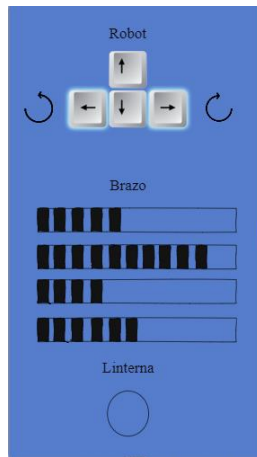


Figura 4. Aplicación conductor segundo prototipo

Tabla 42. Funcionamiento Botones Mockups segundo prototipo

Botón	Funcionalidad
	El carro avanza hacia adelante
	El carro se mueve levemente hacia la izquierda.
	El carro se mueve levemente hacia la derecha.
	El carro retrocede.
	El carro gira completamente sobre su propio eje hacia la izquierda.
	El carro gira completamente sobre su propio eje hacia la derecha.
	<p>Son cuatro barras referentes a los grados en que se mueve cada una de las partes del brazo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Base, aumenta o disminuye el pulso enviado al servomotor, el cual mueve la base del brazo.</li> <li>▪ Izquierda, aumenta o disminuye el pulso enviado al servomotor, el cual contribuye al movimiento del brazo.</li> <li>▪ Derecha, aumenta o disminuye el pulso enviado al servomotor, el cual contribuye al movimiento del brazo.</li> <li>▪ Pinza, aumenta o disminuye el pulso enviado al servomotor, el cual contribuye al movimiento de la pinza.</li> </ul>
	Enciende o apaga el led.

## 7. CONCLUSIONES

- El módulo IOIO se puede programar fácilmente descargando la librería respectiva en Android Studio.
- Realizar las aplicaciones del operador y del conductor es fácil siempre y cuando se tengan previos conocimientos relacionados con la programación en Android Studio.
- La programación para manejar la Raspberry tiene que tener montado un sistema operativo donde se guarda la aplicación que le transmite los datos al robot, en cambio el módulo IOIO recibe instrucciones de una aplicación desarrollada en Android Studio que utiliza la librería del módulo IOIO; por lo tanto, es más fácil realizar el desarrollo del control del robot con el módulo IOIO.
- Cuando se operan las aplicaciones usando Skype el tiempo de respuesta del carro aumenta.
- Para realizar el movimiento desde la aplicación del conductor a distancia, como lo fue en el reto de Mercury, se tenía que tener en cuenta el tiempo de respuesta del carro.

## REFERENCIAS

- [4] [Reglamento Competencia Mercury 2018](#). Corporación Universitaria Nacional. Online [Feb 2018].
- [5] [Tutorial: Uso de Driver L298N para motores DC y paso a paso con Arduino](#). ELECTRONILAB. Online [Mar 2018].
- [6] [el módulo controlador de motores l298n](#). Prometec. Online [Mar 2018].
- [7] [Servo HS-645MG](#). Servocity.com. Online [Mar 2018].
- [8] [L298 Dual full-bridge driver](#). STMicroelectronics. Online [Mar 2018].
- [9] [SG90 9g Micro Servo](#). TowerPro. Online [Mar 2018].
- [10] [Tutorial de Uso del Módulo L298N](#). Naylamp Mechatronics. Online [Mar 2018]
- [11] [Firmware y hardware de IOIO – E/S para Android](#). GitHub. Online [Mar 2018]

# Implementación de una estrategia para el tratamiento de residuos químicos peligrosos en primeros cursos de química de la Facultad de Ingeniería de Uniminuto – Etapa preliminar

Julio C. Rivera R.<sup>1</sup>

Juliana Toro A.<sup>2</sup>

Diego G. Pulido O.<sup>3</sup>

Corporación Universitaria Minuto de Dios  
Bogotá – Colombia

En el marco del proyecto CSP 5 – 017 – 18 aprobado por la Dirección de Investigaciones de Sede Principal de la Corporación Universitaria Minuto de DIOS, se implementará una estrategia para el tratamiento y disposición final de los residuos químicos peligrosos generados en los laboratorios de Química SP de la Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Minuto de DIOS durante el segundo semestre de 2018. La situación actual en la institución sólo involucra la segregación, almacenamiento quien realiza la disposición final de los mismos, pero no considera un tratamiento previo que permita su disposición final y su fin último es la entrega de los residuos generados a una empresa externa (ECOCAPITAL). Para resolver esta situación se implementará un protocolo de tratamiento de residuos con el cual se busca: Disminuir el volumen de residuos generados ahorrando costos a la universidad, aprovechar algunos residuos generados al reutilizarlos en las prácticas ahorrando nuevamente costos e Involucrar a los estudiantes, administrativos y profesores en el tratamiento de estos residuos incentivando el componente ambiental y ecológico en los estudiantes en concordancia con las políticas institucionales a través de la elaboración de un plan operativo estándar y que mitiguen esta problemática.

## 1. INTRODUCCIÓN

La acumulación incontrolada de los residuos químicos peligrosos de los laboratorios de ingeniería a nivel de educación superior, conlleva a importantes problemas medio ambientales y de seguridad e higiene para todo el personal. Debido a ello debe existir un sistema que permita su correcto manejo y control. Este proyecto de investigación implementará una metodología para el tratamiento y disposición final de algunos residuos químicos peligrosos generados en los laboratorios de Química en Sede Principal de Ingeniería de la Corporación Universitaria Minuto de DIOS. Para ello, se ha considerado la normatividad vigente y la legislación ambiental que rige el sistema de manejo y gestión de residuos, el cual considera variables como el grado de peligrosidad, el grado de toxicidad y emisiones generadas por las diferentes sustancias químicas. Se implementarán métodos de tratamiento y aprovechamiento de residuos químicos de interés y se analizará el impacto al medioambiente como resultado de los procedimientos para el tratamiento, asimismo, resultados de los análisis para la Identificación de peligros, evaluación de los riesgos para cada actividad realizada.

## 2. MÉTODO

La presente investigación se considera de tipo experimental y en un nivel descriptivo y explicativo, en respuesta a que se pretende realizar una estrategia de manejo, prevención y control de sustancias químicas peligrosas. Para tal fin, este proyecto ha contemplado seis fases a realizar, las cuales se describen a continuación:

- Fase 1. Diagnóstico y caracterización. Identificar las sustancias químicas de tratamiento simple en las prácticas de laboratorio
- Fase 2. Establecimiento de un protocolo para el tratamiento de los residuos de interés. Diseñar un protocolo de tratamiento y disposición final de residuos y un protocolo para el aprovechamiento y valorización de residuos de interés integrados a las prácticas de laboratorio de los primeros cursos de química de SP.
- Fase 3. Implementación del protocolo de tratamiento y valorización de residuos. Articulación de la propuesta con la coordinación de los Laboratorios de Química de Calle 90 de sede principal - Bogotá.
- Fase 4. Evaluación de la calidad de los residuos post-tratamiento para su vertimiento o reutilización. Evaluación de los diferentes parámetros fisicoquímicos para determinar la calidad de las sustancias obtenidas post - tratamiento de residuos.
- Fase 5. Divulgación y capacitación interna. Formación e integración de profesores, laboratoristas y trabajadores de la institución universitaria sobre la actualización del Sistema de Gestión de Residuos de calle 90 de SP.
- Fase 6. Difusión y divulgación externa. Divulgación de la estrategia de gestión integral de residuos en Seminarios y/o Congresos.

---

<sup>1</sup> Jriverarod3@uniminuto.edu.co

<sup>2</sup> jtoroacosta@uniminuto.edu.co

<sup>3</sup> dpulidoort2@uniminuto.edu.co



### 3. MARCO TEÓRICO

Dentro de los fundamentos teóricos que soportan esta investigación, se hace necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones conceptuales como legales en cuanto a sustancias químicas peligrosas: En primer lugar, un plan operativo estándar (POE) es una herramienta que permite describir la mayoría de los detalles técnicos, pero no en su totalidad. Se considera útil para los laboratorios respecto a la estandarización de técnicas que permitan facilitar la comparación de los resultados y vislumbran los cambios requeridos y adecuados a través de desarrollos tecnológicos lo cual requiere de la estandarización de ciertas técnicas para facilitar la comparación de resultados [1], [2] y [3].

Un aspecto fundamental que se ha de tener en cuenta son las etiquetas de los recipientes que contienen los productos químicos los cuales deben indicar: el nombre del producto; una de las tres palabras (peligro, atención, precaución) que indican el grado relativo de peligrosidad del producto; las medidas de precaución necesarias para su manejo; medidas en caso de incendio (si aplica); medidas especiales (si son necesarias) y el nombre, dirección y teléfono de fabricante y distribuidor. La advertencia se hace sobre el riesgo de una mercancía, por medio de colores y símbolos, que se ubican en lugares visibles [4]

En general toda sustancia química, bajo condiciones específicas, presenta algún riesgo para las personas y las instalaciones. Sin embargo, existe un gran número de ellas que pueden ocasionar lesiones, accidentes y daños con gran facilidad y sin que se requiera de unas condiciones extremas. Estas son las llamadas sustancias químicas peligrosas y exigen mayor atención. Las sustancias peligrosas son aquellos elementos químicos, compuestos o mezclas, tal como se presentan en su estado natural o como se producen en la industria, que originan:

1. *Riesgos para la Salud*: al causar efectos agudos inmediatos o efectos crónicos en la salud de las personas o seres vivos expuestos.
2. *Riesgos por las propiedades fisicoquímicas*: al ocasionar incendios, explosiones o descomposiciones violentas en presencia de calor, oxígeno, agua y otros factores externos.

Las principales características perjudiciales de las sustancias y los productos químicos en general, son: Toxicidad, Inflamabilidad y Explosividad, Reactividad Violenta, Radioactividad.

1. La Toxicidad se define como el potencial que tiene una sustancia para afectar adversamente la salud de los humanos y de los seres vivos en general, a través de la producción de lesiones reversibles o irreversibles o poniendo en peligro su vida o causando la muerte, después de su ingreso en el organismo, en cantidades, concentraciones, dosis y tiempos de exposición característicos de cada sustancia, según se explica más adelante.
2. La Inflamabilidad, Explosividad, Reactividad Violenta y Radioactividad son factores de peligrosidad que dependen de las características físico-químicas, de la manera como se manipulan, de factores externos como calor y chispas y de la presencia de materiales incompatibles entre sí. Más de 600.000 sustancias químicas y sus derivados son considerados como peligrosos.
3. El grado de riesgo de cada sustancia, para la salud de los trabajadores y los usuarios en general, depende de varios factores, tales como: El estado físico en que se encuentran estas sustancias (sólido, polvo, humo, líquido, neblina, vapor, gas)
4. La concentración de la sustancia en el ambiente afecta: Las condiciones del puesto de trabajo y el ambiente laboral, Las vías de ingreso de la sustancia al organismo humano, El tiempo de exposición y la susceptibilidad de la persona o personas expuestas.

En el ámbito legal, se tienen en cuenta los siguientes decretos, artículos y leyes sobre sustancias químicas peligrosas que fundamentan esta investigación:

- El Decreto Ley 1295 de 1994, expedido por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social por el cual se determina la Organización y Administración del Sistema General de Riesgos Profesionales, menciona en su artículo 64 las características de las empresas de alto riesgo [5] y [6], entre las cuales se incluyen las que «manejan, procesan o comercializan sustancias químicas altamente tóxicas, cancerígenas, mutágenas, teratógenos, explosivos y material radioactivo...». Además, en sus artículos 66 y 67 se establecen una supervisión especial y la presentación de informes periódicos.
- El artículo 64 del citado Decreto Ley 1295 fue modificado posteriormente por el Decreto 2150 de 1995 (que trata sobre la supresión de trámites en la Administración Pública), limitando el control especial del Estado sólo a las empresas que utilicen sustancias químicas peligrosas que sean pertenecientes a las clases IV y V de la clasificación de actividades económicas del Decreto 1295 [7] y [8].
- El control de sustancias químicas peligrosas en empresas I, II, III, sigue siendo regulado por la Resolución 1016, Artículo 10 y 11 de marzo de 1989 de los Ministerios Salud, Trabajo y Seguridad Social [9]. El Decreto Ley 1281 de 1994, adicionalmente, reglamenta el derecho a pensión de vejez anticipada en trabajadores que hayan trabajado un mínimo de 500 semanas con sustancias químicas altamente tóxicas.
- De acuerdo con la Ley 55 de 1993 sobre Seguridad en la Utilización de Productos Químicos en el Trabajo [10], la expresión «utilización» implica toda actividad laboral que podría exponer a un trabajador a un determinado material o mezcla de productos químicos y comprende: La producción, la manipulación, el almacenamiento, el

transporte, la eliminación y el tratamiento de desechos, la emisión de contaminantes, el mantenimiento, la reparación y la limpieza de equipos y recipientes utilizados.

#### 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Dentro de la Facultad de Ingeniería de SP de la Corporación Universitaria Minuto de DIOS, se ofertan los programas de Ingeniería Civil, Ingeniería Industrial e Ingeniería Agroecológica en los cuales se encuentra el espacio académico de Química Inorgánica. De acuerdo con lo anterior, es oportuno señalar que este proyecto es transversal y se encuentra actualmente en la primera fase.

En esta primera etapa del proyecto, se efectuó una revisión a las guías de laboratorio tanto antiguas como nuevas las cuales son utilizadas por los profesores de Química Inorgánica de primeros semestres en la Corporación Universitaria Minuto de DIOS y se encuentra que la institución universitaria cuenta con (24) cursos de química inorgánica para los tres programas de ingeniería, con un total de (500) estudiantes tanto en la jornada tarde y noche. En cada espacio académico a lo largo del semestre son realizadas (6) seis prácticas experimentales las cuales abordan las temáticas tratadas en la parte teórica y que obedecen a la consolidación y conformación de grupos de laboratorio de máximo (4) estudiantes. Por parte del área de química, se ha efectuado la revisión correspondiente de cada una de las prácticas de laboratorio establecidas en las cuales fueron detectadas algunas sustancias químicas peligrosas derivadas de las reacciones químicas correspondientes en cada uno de los procesos experimentales. A continuación, se relacionan las sustancias químicas peligrosas y la generación de nuevas sustancias obtenidas por los procesos de las reacciones químicas.

##### 4.1 Práctica No. 1. Propiedades intrínsecas y extrínsecas de las Sustancias

En esta práctica se reconocen las partes del mechero, se determina la masa, densidad y volumen de sólidos y líquidos por medio de la probeta y se realizan otras técnicas tales como el lactodensímetro para determinar la densidad de diferentes tipos de leche y el refractómetro para trabajar con sustancias azucaradas, y finalmente, se lleva a cabo la determinación del punto de fusión y ebullición del ácido cítrico y el alcohol etílico. Los remanentes son depositados en los colectores, pero se encuentra que no aparece ningún residuo químico peligroso a tratar durante dicho trabajo práctico experimental.

##### 4.2 Práctica No. 2. Técnicas de separación y mezclas

El abordaje de esta experimentación se encuentra constituido por diferentes técnicas para la separación de mezclas tales como:

1. Evaporación - filtración, en donde son mezclados el ácido acetilsalicílico, la sal de cocina y el azufre (S). Al final del experimento queda un remanente aproximado de 0.5 g de azufre por cada uno de los grupos y en total en cada espacio académico de recolectan unos tres gramos los cuales dan un valor general por 24 grupos de química de 72 gramos de acumulado del residuo químico los cuales no son dispuestos en ningún colector sino son depositados en las canecas del laboratorio de química.
2. Otro proceso que fue llevado a cabo es el de la recrystalización de 0.5 g ácido benzoico ( $C_7H_6O_2$ ) con 2 ml de etanol ( $C_2H_5OH$ ), lo cual es depositado en el colector. En un cálculo aproximado por cada asignatura nos da un promedio de 12 ml y a nivel general un valor total de 288 ml de dicho residuo químico como lo muestra la Figura 1.



Figura 1. Proceso de recrystalización

3. En esta práctica son utilizadas otras técnicas como la cromatografía de la espinaca, la destilación simple de la yerbabuena, la sublimación del yodo y la centrifugación de la harina con agua, las cuales no generan residuos químicos peligrosos a través de reacciones químicas.

##### 4.3 Práctica 3. Elementos metálicos y no metálicos (Funciones inorgánicas)

1. El desarrollo de este trabajo práctico experimental comienza con la reactividad química de los metales  $Na_{(s)}$ ,  $K_{(s)}$  y  $Ca_{(s)}$  respectivamente con 10 ml de agua en cada uno de ellos y agregando papel tornasol azul y rojo con 3 gotas de fenolftaleína para obtener los respectivos hidróxidos, como lo muestra la Figura 2. Por cada grupo académico se recopilan 150 ml derivados de los tres experimentos enunciados y al llevar ese valor al plano general tenemos más de 3.6L de base que son depositadas en el colector y llevadas al cuarto de almacenamiento.



**Figura 2.** Reactividad química de metales alcalinos

- En la Figura 3 se observa la combustión completa de Mg con oxígeno por intermedio de calor y luego en contacto con el agua. Dicha experimentación deja un remanente de 10 ml los cuales son tratados con papel tornasol y agua para la formación del respectivo hidróxido por cada equipo de laboratorio. Por curso de recopilan unos 60 ml y a nivel general son depositados 1440 ml de dicha base por los 24 grupos con los que cuenta la universidad.



**Figura 3.** Combustión del Mg y formación del  $Mg(OH)_2$

- En esta práctica se llevan a cabo dos experimentos adicionales que son el reconocimiento de metales y no metales y la identificación del color de diferentes sales (espectro de emisión) a través del asa de platino los cuales no generan residuos químicos peligrosos.

#### 4.4 Práctica No. 4. Transformación de la materia y reacciones químicas

- La Figura 4 muestra la oxidación del hierro en presencia de 3ml de Sulfato de cobre. Para los 24 grupo de química de recolectan en los vidones un valor aproximado de 432 ml como metales pesados.



**Figura 4.** Oxidación del Fe en  $CuSO_4$

- La formación de las agujas de plata se observa en la Figura 5, en donde intervienen  $AgNO_3$  con la varilla de cobre. De manera general por los 24 grupos de química se recolectan 720 ml como metales pesados. El anterior y este, son depositados en el mismo recipiente.



**Figura 5.** Formación de agujas de Plata

- La Figura 6 muestra la hidratación y deshidratación del sulfato de cobre penta hidratado  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ . Esta reacción genera un remanente de 1 ml por cada uno de los grupos constituidos los cuales son depositados en el colector de sales. A nivel global se almacenan aproximadamente 150 ml de dicha sal.



**Figura 6.** Deshidratación e hidratación del  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

La formación del enlace covalente coordinado donde interactúan  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  con el  $\text{NH}_4\text{OH}$  el residuo es de 1 ml (Figura 7) lo cual genera en el acumulado un valor aproximado de 150 ml que son depositados en el mismo colector de metales pesados.



**Figura 7.** Formación del enlace covalente coordinado

4. La Figura 8 muestra la formación del enlace covalente coordinado a partir de 1ml de  $\text{AgNO}_3$  y 1ml  $\text{NaCl}$  en presencia del  $\text{NH}_4\text{OH}$  lo cual genera 360 ml de la sal formada por los (24) grupos de química.



**Figura 8.** Formación del enlace covalente coordinado 2

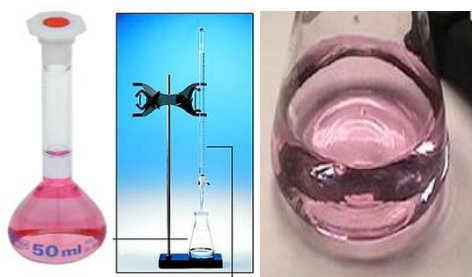
5. En la Figura 9, se refleja los elementos para la obtención del  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  a partir del  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ . Este último fue utilizado en un valor de 0.5 gramos en masa. En promedio por cada espacio académico son gastados 3 g y el valor obtenido por los (24) grupos de química es de 75 gramos de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  los cuales son depositados en el colector respectivo.



**Figura 9.** Obtención del  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  a partir del  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

#### 4.5 Práctica 5. Determinación de PH y titulación ácido base

En la Figura 10 se presenta la preparación de las soluciones  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0.5 M) y de  $\text{NaOH}$  (0.5 M) con un volumen de 50 ml para llevar a cabo el proceso de titulaciones por cada equipo de laboratorio, las cuales fueron utilizadas para este experimento. El valor general por los 24 grupos de química es 7,2 L para cada una de ellas los cuales son depositados en los respectivos colectores.



**Figura 10.** Preparación de la solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{NaOH}$

#### 4.6 Práctica 6. Gases

La Figura 11 nos muestra el montaje para la obtención de  $\text{CO}_2(\text{g})$  a partir de las reacciones entre el  $\text{CH}_3\text{COOH}$  y el  $\text{NaHCO}_3$ . Igualmente, se llevó a cabo también la reacción del  $\text{CH}_3\text{COOH}$  y el Alkaseltser los cuales generan un valor de 10ml en el tubo de ensayo para cada experimento. El valor acumulado es de 2.4 L por los (24) grupos de química los cuales son depositados en el respectivo colector.



Figura 11. Montaje para la obtención de  $\text{CO}_2$  a partir de  $\text{CH}_3\text{COOH}$

#### 5. CONCLUSIONES

Culminado el primer semestre de 2018, se puede concluir que la universidad cuenta con un cuarto para almacenar los residuos químicos a través de galones los cuales se encuentran rotulados y dispuestos para la recolección semestral del operador contratado por la institución (Ecocapital).

A la fecha, la investigación se encuentra en el proceso de las fases 2 y 3 que tienen como finalidad la elaboración de un protocolo operativo estándar e indagar si en lo posible se pueden tratar los residuos de interés del proceso, es decir, los remanentes como las bases para llevar a cabo proceso de neutralización a manera de ejemplo preliminar.

Para el segundo semestre se pretende trabajar de manera conjunta con los profesores, la coordinación de laboratorios, administrativos y el personal de seguridad en el trabajo para llevar a cabo la socialización de esta primera etapa y compilar en forma conjunta el (POE) como instrumento articulador el cual permita de manera integral y conjunta la viabilidad institucional para el manejo de los residuos químicos peligrosos. En la misma medida y de manera conjunta se pretende establecer la utilidad y alcance de llevar un análisis de los parámetros fisicoquímicos de dichas. En este orden de ideas, será involucrado el análisis económico y la risca. A partir de ello, se pretende ver si es rentable o no para la institución en cuanto a la relación costo beneficio incluyendo todos los aspectos relacionados con la normatividad ambiental y así proponer para los posteriores años un macro proyecto interinstitucional que coadyuve a otras facultades de ingeniería en cuanto a esta situación que solamente involucra un espacio académico de química inorgánica y que deja de lado otros cursos como los de química orgánica, microbiología, entre otros a nivel de nuestra institución.

#### Agradecimientos

Agradecemos a las diferentes instancias para la ejecución de este proyecto: Corporación Universitaria Minuto de DIOS, Dirección de Investigaciones de SP, Facultad de Ingeniería SP, Parque Científico de Innovación Social – Calle 90 Bogotá- Colombia, Dirección de Investigaciones de SP, Coordinación de Laboratorios, laboratoristas, estudiantes y co-investigadores.

## REFERENCIAS

- [1] Colmenares, J. et al. (2010). Diseño e implementación de protocolos de seguridad para los laboratorios que presentan riesgo químico y biológico en la facultad de salud de la Universidad Industrial de Santander. UIS Bucaramanga.
- [2] Rojas, M. & Mayorga, J. (2010). Diseño e implementación de protocolos de seguridad para los laboratorios de Química, Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica que presentan riesgo químico y biológico en la sede central de la Universidad Industrial de Santander. UIS Bucaramanga.
- [3] Who/Undp/World Bank 2001. World Hanbook. Goodlaboratory practice. Ginebra.
- [4] Icontec (1998). NTC 1692. Sustancias químicas peligrosas: Clasificación, marcado y rotulado. Bogotá.
- [5] Mora, J. et al. (2012). Gestión de desechos químicos en laboratorios de la Universidad Nacional. Tecnología en marcha 25(1), 64-69.
- [6] Icontec (1996). NTC 3966. Transporte de Sustancias químicas Peligrosas. Clase1. Explosivos. Bogotá.
- [7] Ministerio de Transporte (1999). [Manual de Transporte de Sustancias químicas Peligrosas](#). Online [May 2018].
- [8] MinTrabajo (1994). Decreto Ley 1295. Organización y Administración del Sistema General de Riesgos Profesionales. Bogotá.
- [9] Mintrabajo (1989). Resolución 1016. Reglamentación para la organización, funcionamiento y forma de los Programas de Salud Ocupacional que deben desarrollar los patronos o empleadores en el país. Bogotá.
- [10] OIT (1990). Seguridad en la utilización de productos químicos en el trabajo adoptados por la 77 reunión general de la OIT. Ginebra.



Editorial  
IAI

## **INVESTIGACIÓN FORMATIVA EN INGENIERÍA** (Segunda Edición)

Los capítulos que conforman la segunda edición de Investigación Formativa en Ingeniería plasman el esfuerzo y el trabajo de los estudiantes en diferentes disciplinas ingenieriles y Ciencias Computacionales. El acompañamiento de profesores y asesores de los semilleros y los trabajos de grado, desde los que se originan los trabajos que contiene este texto, es digno de reconocimiento y de exaltación porque su aporte también se refleja en el contenido que los lectores tienen a su alcance. Cada uno de los autores se ha esforzado hasta agotar sus capacidades para redactar los trabajos que se presentan a la comunidad en este libro, por lo tanto, esperan que se valore en la misma medida.

ISBN: 978-958-56686-0-7