



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

# REVISTA. Ingeniería

Volumen 25 • Número 3 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

# 2020

# REVISTA Ingeniería

Volumen 25 · Número 3 · Año 2020 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

## REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Carrera 7 No. 40-53  
Edificio Administrativo  
Piso 7 - Facultad de Ingeniería  
Bogotá, Colombia  
Teléfono: + 57 (1) 323 93 00 ext. 2413  
Correo revista:  
revista\_ing@udistrital.edu.co

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving>

## POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico enfocada en la gran área de conocimiento de Ingeniería y Tecnología, de acuerdo a la clasificación de la OCDE, con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería y la Tecnología. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la Ingeniería y la Tecnología a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

## EDITOR

**Nelson L. Díaz, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

## COMITÉ EDITORIAL

**Sarah Greenfield, PhD.**  
Faculty of Technology of  
Montfort University,  
Reino Unido

**Carlos Andrés Peña, PhD.**  
Institute for Information and Commu-  
nication Technologies - Haute Ecole  
d'Ingénierie et de Gestion du Canton  
de Vaud, Suiza

**Alonso Salvador Sanchez, PhD.**  
Universidad de Alcalá,  
España

**Iván Santelices Malfanti, PhD.**  
Universidad del Bio-Bío,  
Chile

**Jose Marcio Luna, PhD.**  
Perelman School of Medicine,  
University of Pennsylvania, Estados Unidos

**Carlos Eduardo Moreno, PhD.**  
Universidad Nacional de  
Colombia

**José Luis Villa, PhD.**  
Universidad Tecnológica de  
Bolívar, Colombia

**Víctor Hugo Grisales, PhD.**  
Universidad Nacional de  
Colombia

**César Leonardo Trujillo Rodríguez, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Juan Carlos Figueroa, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Josep M. Guerrero, PhD.**  
Aalborg University, Dinamarca

## COMITÉ CIENTÍFICO

**Germán Jairo Hernández, PhD.**  
Universidad Nacional  
de Colombia

**Germán Méndez Giraldo, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Paulo Gaona García, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Francisco Santamaría Piedrahita, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Gustavo Puerto Leguizamón, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Diego Rodríguez Patarroyo, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Elvis Eduardo Gaona García, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

## DIRECTIVAS

**Ricardo García Duarte**  
Rector

**Giovanny Tarazona Bermúdez, PhD.**  
Director Centro de Investigación  
y Desarrollo Científico

**Julio Barón Velandia, PhD.**  
Decano de la Facultad de Ingeniería

## PREPARACIÓN EDITORIAL

**Fabian Ríos Gutierrez, MSc.**  
Gestor Editorial

**Jenny Alexandra Jimenez, MSc.**  
Corrección de Estilo

**José Daniel Gutierrez García.**  
Corrección de Estilo

**Julian Arcila-Forero, MSc.**  
Diseñador  $LATEX$

## AGRADECIMIENTOS WEA 2020:

El desarrollo del Workshop on Engineering Applications – WEA 2020 fue todo un éxito, en los tres días de conferencia tuvimos más de 1500 asistentes. En nombre de los comités del evento, queremos agradecer a todos los patrocinadores: Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital, Escuela de Ingeniería del Ejército Nacional de Colombia, Corporación Unificada Nacional - CUN, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, al capítulo estudiantil IEEE de la Universidad Distrital y a la secretaria de ciencia y tecnología de la gobernación de Cundinamarca por su invaluable apoyo y ayuda. A su vez, un agradecimiento especial a todos los panelistas, autores y pares evaluadores que hicieron posible el desarrollo del evento.

## PERMISO DE REPRODUCCIÓN

### Open access



Los artículos incluidos en esta edición se encuentran bajo la licencia "Atribución - No Comercial - Compartir igual"; esta licencia permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de tu obra de modo no comercial, siempre y cuando te den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

Atribución - No Comercial - Compartir igual.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Ni la Revista INGENIERÍA, Editor, Comité Editorial, Comité Científico, Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital F.J.C., otorgan ninguna garantía, expresa o implícita, a asumen responsabilidad alguna por la exactitud, completitud o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o que represente que su uso no infrinja derechos privados. La mención o referencia a algún producto, proceso o servicio comercial en específico, por su marca comercial, marca registrada, fabricante o cualquier otra denominación, no implica ni constituye su endoso, recomendación endosa, recomendación o favorecimiento por parte de la Revista INGENIERÍA. Los juicios y opiniones expresadas por los autores en este medio son de su responsabilidad y no establecen, reflejan o comprometen los de la Revista INGENIERÍA.

## COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

La Revista INGENIERÍA no realiza ningún cobro por las postulaciones, evaluación y publicación de los artículos sometidos. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas asume los gastos relacionados con el proceso de edición, gestión y publicación. Los Pares Evaluadores realizan su contribución de manera voluntaria y sin retribución económica.

## INDIZADA EN



## ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

**Néstor Jaime Aguirre-Ramírez, PhD.**  
Universidad de Antioquia

**Jennifer Guevara, PhD.**  
Universidad Regional Amazónica Ikiam

**Manuel I. Guerra-Romero, PhD.**  
Universidad de León

**Armando Pérez, PhD.**  
Universidad Autónoma de Baja California

**Luis Suárez-Zambrano, MSc.**  
Universidad Técnica del Norte

**Adriana Luna Hernández, PhD.**  
Universidad Antonio Nariño

**César Trujillo Rodríguez, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Josè Antenor Pomílio, PhD.**  
Universidade Estadual de Campinas

**Feizar Rueda Velasco, MSc.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Juan Carlos Figueroa, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Eduyn Lopez Santana, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Gustavo Suarez Guerrero, PhD.**  
Universidad Pontificia Bolivariana

**John Gomez, PhD.**  
Sosialt Arbeid Bergen Komunne

**Gabriela Suchoparova, MSc.**  
Charles University, Prague

**Eduardo Abreo, PhD.**  
Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - Uruguay

**Kennia Doncato, PhD.**  
Universidade Federal do Rio Grande - Brasil

**Noelia Betoret, PhD.**  
Universitat Politècnica de València – España

**Gerardo Muñoz Quiñones, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**José Manuel Mejía, PhD.**  
Universidad Autónoma De Ciudad Juárez - México

**Johnnatan A. Rodríguez, PhD.**  
Universidad EIA – Colombia

**Jan Amaru Töfflinger, PhD.**  
Pontificia Universidad Católica del Perú - Perú

**Fredy Giovanni Mesa, PhD.**  
Universidad del Rosario

**Júlio César José Silva, PhD.**  
Universidade Federal de Juiz de Fora

**Esteban Durán Herrera, PhD.**  
Universidad de Costa Rica

**Luis Alejandro Díaz Aldana, PhD.**  
Idaho National Laboratory

**Edilberto Llanes Cedeño, PhD.**  
Universidad Internacional SEK

**Fabián Cuzme-Rodríguez, MSc.**  
Universidad Técnica del Norte

**Miguel De Simón-Martín, PhD.**  
Universidad de León

**Jesse Y. Rumbo-Morales, PhD.**  
Universidad de Guadalajara

**Frank Ballesteros-Riveros, MSc.**  
Universidad Militar Nueva Granada

**Javier Orjuela-Castro, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Carlos Franco, PhD.**  
Universidad del Rosario

**Diana Guzmán Cortés, MSc.**  
Pontificia Universidad Javeriana

**Wilfredo Angulo Sanchez, MSc.**  
Espol/Ecuador

**Petra Vidnerová, PhD.**  
Charles University, Prague

**Roman Neruda, MSc.**  
Charles University, Prague

**Víctor Hernández S, PhD.**  
Universidad de Concepción - Chile

**Elisa Inés Benítez, PhD.**  
Universidad Tecnológica Regional - Argentina

**Erick Scheuermann, PhD.**  
Universidad de la Frontera - Chile

**Jhoan Sebastian Tenjo, MSc.**  
Universidad Nacional de Colombia

**Darwin Castillo, MSc.**  
Universidad Técnica Particular de Loja - Ecuador

**Arturo Abúndez Pliego, PhD.**  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - México

**Pedro Pérez Higuera, PhD.**  
Universidad de Jaén - España

**José Javier Valencia, PhD.**  
Universidad Autónoma Metropolitana - México

## TABLE OF CONTENTS

### Editorial

- Applied Engineering in Times of Crisis: Building a Better World** 221  
*Ingeniería aplicada en tiempos de crisis: construyendo un mundo mejor*  
Juan Carlos Figueroa-García · Julio Barón Velandia · Nelson Leonardo Díaz

### Ingeniería Ambiental

- Influence of Soils on Nutrient Transfer Dynamics at the Soil-Water Interface of a Tropical Reservoir** 223  
*Influencia de los suelos en la dinámica de transferencia de nutrientes en la interfase suelo-agua en un embalse tropical*  
Diana Catalina Rodríguez Loaiza · Tatiana Arias · Gustavo Peñuela

- Recovery and Incorporation of expanded polystyrene Solid Waste in Lightweight Concrete** 237  
*Recuperación e incorporación de residuos sólidos de poliestireno expandido en concreto Liviano*  
María Paula Espinoza-Merchán · Laura Juliana Torres-Parra · Nicolas Rojas-Arias · Pablo Miguel Cocha-Vesga

### Ingeniería Mecánica

- Analysis of Power and Torque Performance of a Diesel Engine Operating with Palm Biodiesel Blends** 250  
*Análisis del desempeño de la potencia y el torque de un motor diésel operando con mezclas de biodiésel de palma*  
Daniel Andrey Herrera Susa · José Ricardo Bermúdez Santaella · Carlos Eduardo Castilla Álvarez

### Ingeniería de Sistemas

- Knowledge Base Model for Security Audits in Web Services with SQL Injection** 264  
*Modelo base de conocimiento para auditorías de seguridad en servicios web con inyección SQL*  
John Edison Moreno Marín · Paulo Cesar Coronado Sánchez

### Ingeniería Eléctrica y Electrónica

- Analysis for Selection of Battery-Based Storage Systems for Electrical Microgrids** 284  
*Análisis para la selección de sistemas de almacenamiento basados en baterías para microrredes eléctricas*  
Rafael Antonio Peña Suesca · Andrés Ignacio Santos León · César Leonardo Trujillo Rodríguez

- Comparative Study of a Regenerative Braking System and Regeneration with Constant Kinetic Energy in Battery-based Electric Vehicles** 305  
*Estudio comparativo de un sistema de freno regenerativo y regeneración con energía cinética constante en vehículos eléctricos de batería*  
Cristian Monroy · Cristian Siachoque · Iván Camilo Duran Tovar · Agustín Marulanda

### Sección Especial: Mejores artículos extendidos - WEA 2020

- Mathematical Model for Centralized Supply Chains with Decisions Involving Shared Resources** 323  
*Modelo matemático para cadenas logísticas centralizadas con decisiones de recursos compartidos*  
Carlos Franco · Diana Guzmán Cortés · Juan Carlos Figueroa García

- Optimal Placement of Capacitors, Voltage Regulators, and Distributed Generators in Electric Power Distribution Systems** 334  
*Ubicación óptima de capacitores, reguladores de tensión y generadores distribuidos en sistemas eléctricos de distribución*  
Luis Alfonso Gallego Pareja · Jesús María López Lezama · Oscar Gómez Carmona

- The Sustainable Supply Chain: Concepts, Optimization and Simulation Models, and Trends** 355  
*La cadena de suministro sostenible: conceptos, modelos de optimización y de simulación y tendencias*  
Janna Gamboa · Javier Arturo Orjuela Castro · Carlos Eduardo Moreno Mantilla

**Analysis, Design, and Multi-physics Simulation of a Terahertz Photoconductive Antenna Using the Finite Element Method** 378

*Análisis, diseño y simulación multifísica de una antena Fotoconductora Terahertz usando el método de elementos finitos*

Diana González · Cristhian Torres · Óscar Corredor Camargo · David Suárez · Carlos Criollo Paredes

---

**Design of a Troubleshooting Digital Test Bench for the Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 and 350 Aircraft GCU** 393

*Diseño de un banco digital de pruebas para solución de problemas en la GCU de las aeronaves Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 y 350*

Carlos Arturo Cabrera · Fabian Steven Garay · Ingrid Arango · Óscar Edilson Gómez ·

---

**Application of a Supervised Learning Model to Analyze the Behavior of Environmental Variables in a Coffee Crop** 410

*Aplicación de un modelo de aprendizaje supervisado para analizar el comportamiento de variables medioambientales en un cultivo de café*

William Ruiz Martinez · Roberto Ferro Escobar · Javier Moncada

---

**Design and Prototyping of an Electronic Cane for an Indoor Guide System for the Blind** 425

*Diseño y prototipado de bastón electrónico para un sistema de guía en interiores para invidentes*

Arnaldo Andrés González Gómez · Yesid Díaz Gutiérrez · Wilson David Flórez Barboza

---

**Electronic Device for Satellite Backup of Automatic Vehicle Location Equipment Using the Iridium Network** 437

*Dispositivo electrónico para respaldo satelital de equipos de localización vehicular automática, utilizando la red Iridium*

Hernán Paz Penagos · Néstor Guerrero Rodríguez

---

**Instructions for Authors** 452

### Applied Engineering in Times of Crisis: Building a Better World

# REVISTA Ingeniería

Humanity has faced several global shocking events from time to time: Roman empire's expansion, Genghis Khan empire, Ancient Greek empire, the French revolution, the black plague, America's invasion, WWI/WWII, the Spanish flu etc., and now the COVID-19 pandemic. Every event has come with their own characteristics and significantly changed the world where some positive/negative effects forced humanity to learn or create knowledge to modify the way we do things. As always, normal people do not believe they should face one of those events in their lives due to different reasons: it looks much more a historical book's stuff, they think modern world is ready to handle those events, or they simply rely too much on their governments to solve/handle big issues.

COVID-19 pandemic taught us that even the smallest virus can push humanity to a breakdown, it also reminds us that nature is smarter than all scientists and human resources together and there's no strong enough government able to guarantee population's safety not only in health terms but food, energy, economic stability and social order. This way, there's no other way than be flexible and work altogether as human race to face those events using multidisciplinary knowledge and sharing resources where engineering as a discipline is a key tool to advance as a society.

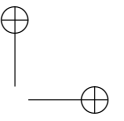
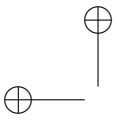
Engineering as a whole is defined as the point where pure and social sciences converge to the development of society in different ways, to build a better world and to plan a brighter future. Engineering needs pure math, physics, chemistry as a base to build everything over steel, but it also needs to be based on arts and social concepts to be valuable for a society. COVID-19 has dramatically impacted global economy and operations at a high cost and it's time to re define our economic agenda and priorities, so engineering is a key discipline that will create the path to a new world, a better one we hope.

This issue includes important contributions in several engineering fields including environmental engineering, mechanical engineering, and electrical and electronics engineering. Also, the readers can find a selection of papers presented at the Workshop of Engineering Applications co- sponsored by the Facultad de Ingeniería of Universidad Distrital in order to promote spaces for the dissemination of works at different fields of engineering.

Open access



Citación: N. Diaz, "Applied Engineering in Times of Crisis: Building a Better World.", Ingeniería, vol. 25, no. 3, pp. 221-222, (2020).  
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.17025>

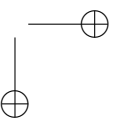
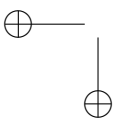


**Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.**   
[jcfigueroag@udistrital.edu.co](mailto:jcfigueroag@udistrital.edu.co)

**Julio Barón Velandia.**   
[jbaron@udistrital.edu.co](mailto:jbaron@udistrital.edu.co)

**Nelson Leonardo Díaz A., PhD.**   
[nldiaza@udistrital.edu.co](mailto:nldiaza@udistrital.edu.co)

**Universidad Distrital Francisco José de Caldas**



## Influence of Soils on Nutrient Transfer Dynamics at the Soil-Water Interface of a Tropical Reservoir

*Influencia de los suelos en la dinámica de transferencia de nutrientes en la interfase suelo-agua en un embalse tropical*

Tatiana Arias<sup>1</sup>, Diana C. Rodríguez<sup>2</sup>, Gustavo A. Peñuela<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ingeniera Sanitaria y Ambiental. Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Sede de Investigaciones Universitarias (SIU), Universidad de Antioquia (UdeA), Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia, <sup>2</sup>Ingeniera Sanitaria. Magíster en Ingeniería, Doctora en Ingeniería. Profesora asociada. Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Sede de Investigaciones Universitarias (SIU), Universidad de Antioquia (UdeA), Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia, <sup>3</sup>Químico. Magíster. Doctor en Química Ambiental. Profesor Titular. Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Sede de Investigaciones Universitarias (SIU), Universidad de Antioquia (UdeA), Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia. Correspondence email: diana.rodriguez@udea.edu.co

Recibido: 04/03/2020. Modificado: 11/08/2020. Aceptado: 26/08/2020.

### Abstract

**Context:** The construction of a reservoir implies flooding different types of soil, which generates a concentration gradient that favors nutrient transfer from the soil to the water column. Soils provide the reservoir with an important nutrient input, which, along with other sources, contributes to the eutrophication process.

**Method:** This study evaluated, under anoxic conditions, the dynamics of nitrogen and phosphorus transfer at a soil-water interface using three types of soil, which was prior to the flooding process of a tropical reservoir. Batch tests were carried out and monitored for periods of 30 days.

**Results:** The results indicated that the maximum phosphorus concentration in the water-soil interface was reached on day 24, on day 15 for ammoniacal nitrogen, and on day 30 for nitrate, where the soil associated with the high plant cover Rastrojo (Ra) had the highest nutrient intake in all trials.

**Conclusions:** It was found that the transfer of nutrients is associated with the degradation of organic matter present in soils, as well as with the reduction of dissolved oxygen, which favors a greater release of ammonia from the soil to the water. Furthermore, it was found that the transfer gradient was proportional to the type of soil texture.

**Keywords:** Eutrophication, flood, nutrients, reservoir, water quality.

**Acknowledgments:** The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Colombian Scientific Program, within the framework of the Ecosistema Científico call for proposals (Contract Nr. FP44842-218- 2018). In addition, they thank the company ISAGEN and GDCON group at the University of Antioquia for their funding through agreement 47/26: "Quantifying GHG Emissions for the Sogamoso Hydroelectric Project".

**Language:** Spanish

### Open access



Cite this paper as: T. Arias, D. Rodríguez y G. Peñuela: "Influencia de los suelos en la dinámica de transferencia de nutrientes en la interfase suelo-agua en un embalse tropical", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 223-236 (2020).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.15993>



### Resumen

**Contexto:** La construcción de un embalse implica inundar diferentes tipos de suelo, lo cual genera un gradiente de concentración que favorece la transferencia de nutrientes desde el suelo hacia la columna de agua. Los suelos proveen al embalse una entrada importante de nutrientes, lo cual, junto con otras fuentes, contribuye a futuro al proceso de eutrofización.

**Método:** Este estudio evaluó, bajo condiciones anóxicas, la dinámica de transferencia del nitrógeno y el fósforo en la interfase suelo-agua, empleando tres tipos de suelos, caracterizados previo al proceso de inundación de un embalse tropical. Los ensayos se realizaron por medio de ensayos batch, los cuales se monitorearon por periodos de 30 días.

**Resultados:** Los resultados indicaron que la máxima concentración de fósforo en la interfase agua-suelo se alcanzó en el día 24, la de nitrógeno amoniacal en el día 15 y la de nitrato en el día 30, donde el suelo asociado a la cobertura vegetal rastrojo alto tuvo el mayor aporte de nutrientes en todos los ensayos.

**Conclusiones:** Se comprobó que la transferencia de nutrientes está asociada con la degradación de la materia orgánica presente en los suelos y a la reducción del oxígeno disuelto, lo que favorece una mayor liberación de amonio del suelo al agua. Además, se encontró que el gradiente de transferencia fue proporcional al tipo de textura del suelo.

**Palabras clave:** Calidad del agua, embalse, eutrofización, inundación, nutrientes.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el Programa Científico Colombiano, en el marco de la convocatoria de propuestas Ecosistema Científico (Contrato No. FP44842-218-2018). Además, agradecen a la empresa ISAGEN y al grupo GDCON de la Universidad de Antioquia por el financiamiento a través del acuerdo 47/26: "Cuantificación de las emisiones de GEI para el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso".

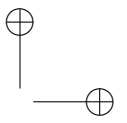
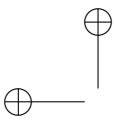
**Idioma:** Español

## 1. Introducción

Los embalses son cuerpos de agua artificiales que presentan características similares a los lagos naturales [1]–[3]. Generalmente son construidos para el abastecimiento de agua, el control de inundaciones y la generación de energía eléctrica; sin embargo, su proceso de construcción implica inundar una amplia extensión de suelo e introducir importantes modificaciones en el ambiente, ya que se transforma un ecosistema terrestre en uno acuático [4], [5].

Los diferentes tipos de suelos que son inundados se convierten en una fuente importante de nutrientes para los embalses, puesto que gran parte de la materia orgánica y los nutrientes que contienen estos, son transferidos a la columna de agua del embalse [6]. Como consecuencia de la oxidación de la materia orgánica contenida en el suelo, en los embalses nuevos se generan condiciones anóxicas que favorecen la liberación de nutrientes [7]–[9]. De esta manera, los suelos contribuyen a la contaminación del agua y, en conjunto con otras fuentes, a la eutrofización de los embalses [10].

Durante el proceso de transferencia, los nutrientes contenidos en el suelo fluyen hacia la columna de agua del embalse como respuesta al gradiente de concentración que se presenta entre ambas fases, siendo la difusión el principal mecanismo de transporte [11], [12]. Este es un proceso altamente complejo que depende no solo de los factores ambientales del agua como son el pH, potencial redox, oxígeno disuelto y temperatura, sino también de la actividad microbiana y de las características del suelo [13]–[15].



Dado que el ingreso de nutrientes a los embalses no solo se da a través del suelo, sino también por medio de sus afluentes, las dos vías en conjunto pueden conducir los embalses a un estado de eutrofización, es decir, a un enriquecimiento de nutrientes que estimula el crecimiento excesivo de plantas y algas acuáticas [16], situación que es particularmente grave en el trópico por la alta disponibilidad de luz y las cálidas temperaturas durante todo el año [8]. Lo anterior da lugar a que la transferencia de nutrientes sea un proceso que afecta la calidad del agua de los embalses, motivo por el cual es fundamental caracterizar los aportes de nutrientes que se dan desde el suelo, al ser una vía para la movilización de estos [14], [17]. Este es un aspecto indeseado, puesto que influye sobre la operación de los embalses y tiene un impacto negativo en los ambientes circundantes.

La mayoría de los estudios evalúan la transferencia de nutrientes a partir de los sedimentos de los cuerpos de agua continentales [3], [8], [11], [15]; no obstante, son muy pocos los estudios que evalúan la transferencia de nutrientes que tienen los suelos en los embalses previo al proceso de inundación o en embalses jóvenes, siendo un ejemplo el estudio realizado por Zhu *et al.* [10], en el cual se encontró que los embalses jóvenes son más frágiles al deterioro y que altas cargas de nutrientes son una condición necesaria la eutrofización. Una de las razones por la que existen pocos estudios sobre el tema es la falta de seguimientos y estudios de línea base que se realizan a los embalses antes de su llenado.

Este es un estudio pionero en Colombia, el cual tuvo como finalidad evaluar bajo condiciones anóxicas, la transferencia de nutrientes desde el suelo hacia la columna de agua, previo al proceso de llenado de un embalse tropical, a partir de tres tipos de suelo y mediante la aplicación de ensayos *batch*. Este artículo contribuye a mejorar el entendimiento de la influencia de los suelos en el ingreso de nutrientes y el proceso de eutrofización de los embalses nuevos, siendo importante para la toma de decisiones y para la gestión del recurso hídrico.

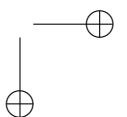
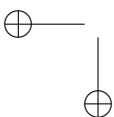
## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Área de estudio

El embalse tropical está localizado en el departamento de Santander, Colombia, en el cañón donde el río Sogamoso cruza la Serranía de La Paz, a 75 km aguas arriba de su desembocadura en el río Magdalena y 62 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Suárez y Chicamocha. La presa y el embalse se localizan en la jurisdicción de los municipios de Girón, Betulia, Zapatoca, Los Santos, Lebrija y San Vicente de Chucurí. El clima de la zona es tropical, caracterizado por tener una temperatura que oscila entre 24,6 y 30,0 °C, velocidad promedio de los vientos de 0,2 m/s, porcentaje de humedad de 51 % y precipitación media de 3000 mm/año [18].

### 2.2. Definición del muestreo

Se definió un muestreo aleatorio estratificado teniendo en cuenta los lineamientos establecidos por [19]–[22]. De esta manera, a partir de imágenes aéreas y del estudio de impacto ambiental realizado en la zona, se delimitaron los tres estratos a muestrear correspondientes a las coberturas: rastrojo



bajo (RB), rastrojo alto (RA) y pastizales arbolados (PA). A cada una de las coberturas se le calculó el área para conocer la proporción del estrato con respecto al área total del embalse y determinar el número de muestras requeridas dentro de cada uno de estos para muestreos estratificados. La asignación del tamaño de la muestra se realizó teniendo en cuenta factores como el número de árboles por hectárea, la importancia que tiene la estimación del carbono para cada estrato y la disponibilidad de información sobre el área.

### 2.3. Tipo y tamaño de las parcelas

La cuantificación de las coberturas ubicadas en el área del vaso del embalse tropical se llevó a cabo en parcelas cuadradas de  $25 \times 25$  m. El tamaño de las parcelas se seleccionó teniendo en cuenta la densidad arbórea (menor a 1111 árboles/ha), el área basal (árboles con DAP  $> 10$  cm) y la cantidad de carbono almacenado (por tipo de cobertura). El número de parcelas se calculó usando tres criterios: el de matrices de decisión para la selección del número de parcelas de acuerdo con el tamaño y error requerido usando las tablas para bosque húmedo tropical no estacional definidas por el IDEAM [21], la mínima unidad estadística con cobertura de área para muestreos de bosques naturales [20] y las ecuaciones establecidas por Orrego *et al.* [22] para muestreos estratificados. Con el primer criterio se estableció que el número de parcelas  $n$  que debían muestrearse con el tamaño de la parcela seleccionada ( $25 \times 25$  m) era de doce, con un porcentaje de error del muestreo definido por el límite superior del error promedio calculado para la estimación de la biomasa igual a 14,5 % con el fin de obtener un nivel de esfuerzo en el monitoreo de carbono según la relación B-C (biomasa-carbono). Usando el criterio de la unidad mínima estadística, tres por estrato y teniendo en cuenta que el área a muestrear fuera igual a 0,05 ha y no inferior (área de muestreo para inventarios forestales de carbono), se obtuvieron las doce parcelas.

En la selección del sitio se utilizaron los siguientes criterios: condiciones locales de sitio que incluye el clima y la edafología, factores de disturbio, viabilidad y la logística (acceso, cercanía a sitio de residencia, seguridad de la zona). Con la finalidad de disminuir los factores disturbios de las parcelas permanentes establecidas y tratar en lo posible que el efecto de borde sea el mínimo, se dejó una franja amortiguadora de 100 m, tal como lo sugiere IDEAM [21]. Se tuvo en cuenta que no se hubiesen realizado procesos de tala de árboles con diámetro mayor a 10 cm ( $D > 10$  cm) y que todas las parcelas estuvieran ubicadas por debajo de la cota 300 que corresponde a la cota de inundación del embalse. La ubicación del primer punto de la parcela se determinó al azar, usando un muestreo sistemático con el fin de evitar la selección subjetiva de las áreas para la ubicación de las parcelas que eventualmente podrían generar sesgos en las estimaciones.

### 2.4. Análisis de suelo

Las muestras objeto de estudio fueron obtenidas de las diferentes coberturas vegetales presentes en el embalse tropical previo al proceso de llenado. Se emplearon muestras de suelos denominadas S1RB, S2RA y S3PA provenientes de las coberturas vegetales RB, RA y PA, respectivamente, dado que estas presentaron un mayor contenido de materia orgánica y una mayor concentración de nutrientes en relación con el resto de los suelos evaluados en estudios previos como parte del establecimiento de la línea base de la investigación. Siguiendo las recomendaciones establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SE- MARNAT-2000 [23], por cada tipo de suelo se tomaron

en campo muestras compuestas de 1 kg a una profundidad de 0-5 cm, las cuales se almacenaron en bolsas plásticas Ziploc y se refrigeraron a 4 °C para conservar sus características fisicoquímicas y evitar la pérdida o el ingreso de nutrientes.

Con la finalidad de determinar las condiciones iniciales de los suelos antes de empezar los experimentos, fue necesario realizar el análisis de sus propiedades fisicoquímicas. Para esto se tomaron submuestras de los tres tipos de suelo y se analizó el porcentaje de humedad, pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), textura, densidad aparente, contenido de materia orgánica, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y fósforo disponible según las metodologías analíticas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi [24], [25]. Los análisis se realizaron en el laboratorio del Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON) de la Universidad de Antioquia, laboratorio acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en la norma 17025:2005 bajo la resolución 3564/2014.

## 2.5. Sistema experimental en *batch*

Los ensayos en *batch* se realizaron utilizando botellas ámbar de vidrio de un litro de capacidad para evitar la interferencia de la luz y simular las condiciones del fondo del embalse. Las botellas fueron mufladas previamente a una temperatura de 550 °C durante cuatro horas para eliminar cualquier traza de material orgánico que pudiera interferir en los experimentos. Para cada ensayo se usaron 50 g de suelo y una altura de columna de agua 0,15 m, empleando 650 ml de agua desionizada. Las botellas fueron cerradas herméticamente y se ubicaron en el laboratorio durante todo el experimento a temperatura ambiente (25 °C). Para inducir las condiciones anóxicas que se presentan un embalse, se burbujeo nitrógeno gaseoso durante un minuto. La duración del experimento se definió de 30 días siguiendo los estudios realizados por Gin y Gopalakrishnan [8] y Zhu *et al.* [10]. El diseño experimental utilizado fue análisis estadístico de tres factores (tipo de suelo), diez niveles (número de lecturas realizadas) y una réplica, la cual se realizó por duplicado.

## 2.6. Análisis de laboratorio

La transferencia de nutrientes se determinó a partir de las concentraciones de nitrógeno y fósforo medidas en el agua de cada botella. La lectura de los parámetros fisicoquímicos en las muestras, tales como nitratos, nitrógeno amoniacal, fosfatos y DQO, se realizaron siguiendo las metodologías establecidas en el *Standard Methods* [26]. Los parámetros directos (pH, potencial redox, oxígeno disuelto y temperatura) se realizaron empleando una sonda multiparamétrica (Quanta-hidrolab).

## 2.7. Estimación de flujo de nutrientes

La expresión propuesta por Zago *et al.* [27] permite estimar los flujos de nutrientes a partir de los gradientes de concentración obtenidos en las muestras de agua en intervalos de tiempo determinados. Valores positivos del flujo indican que la especie química de interés es liberada desde el suelo hacia la columna de agua, mientras que valores negativos del flujo indican que el suelo actúa como un sumidero, es decir, que la transferencia ocurre del agua hacia el suelo.

$$F_i = \frac{\Delta C_i H}{\Delta t_i} \quad (1)$$

Donde  $F_i$  es el flujo en el intervalo de tiempo considerado ( $\text{g/m}^2/\text{d}$ ),  $C_i$  es la diferencia de concentración en el intervalo de tiempo considerado ( $\text{g/m}^3$ ),  $H$  altura de la columna de agua (m) y  $t_i$  es el intervalo de tiempo entre las mediciones  $i$  y  $i + 1(d)$ .

## 2.8. Análisis estadístico

Por medio del programa *R*, versión 3.2.4, se realizaron los estadísticos básicos: máximo, mínimo, promedio y desviación estándar.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Caracterización de los suelos

En la Tabla I se presentan las características fisicoquímicas de los tres tipos de suelo utilizados en los ensayos. De acuerdo con los resultados obtenidos, los suelos S1RB y S2RA se clasificaron como moderadamente ácidos, ya que presentaron valores de pH en el rango de 5,5-6,4 [23], [28], lo cual, según Campillo [29], está asociado con una deficiencia en las concentraciones de nitrógeno y fósforo. Por su parte, el suelo S3PA se clasificó como ácido por tener un valor contenido en el rango de 4,6-5,4 [23], [28] y de forma opuesta se puede asociar con un leve incremento en la concentración de estos nutrientes. La medida del pH es fundamental en la caracterización de los suelos debido a que este parámetro afecta la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la toxicidad asociada a ciertos metales en forma disuelta.

**Tabla I.** Características físicas y químicas de los suelos usados en el experimento.

Parámetro	Unidad	S1Rb	S2Ra	S3Pa
pH		6,00	5,50	5,31
Textura		Franco-arenoso	Franco-arcillosa	Arcilla
Humedad	%	8,736	5,419	22,701
Densidad aparente	g/ml	1,287	1,114	1,179
CIC	meq/100g	30,57	27,5	38,97
Materia orgánica	%	5,6	9,58	7,75
Nitrato	mg $\text{NO}_3^-$ /kg	189,168	361,774	137,435
NTK	%	0,297	0,467	0,549
Fosfato	mg $\text{PO}_4^{3-}$ /kg	6,00 10,016	38,972	24,127

Tomando como referencia el triángulo textural propuesto por la USDA [30] y los criterios establecidos por Casanova [31], el suelo S1RB fue clasificado como franco-arenoso; por lo tanto, en este suelo las posibilidades de infiltración del agua y procesos de lavado serán mucho mayores, disminuyendo la capacidad para retener agua y liberar nutrientes. El suelo S2RA clasificó como franco-arcillosa, en este tipo de suelo se ve favorecida la porosidad y, por tanto, la capacidad de infiltración del agua, la actividad microbiana, el proceso de descomposición de la materia orgánica

y la movilización de los nutrientes. Finalmente, dado que el suelo S3PA presentó una textura arcillosa, su capacidad de retener agua y nutrientes es alta y la de movilización de nutrientes tiende a ser baja en comparación con los otros tipos de suelo.

Al comparar los valores del contenido de materia orgánica cuantificados en los tres tipos de suelos con la clasificación establecida por [23], [28], se encuentra que los tres suelos presentaron un alto contenido ( $> 4,01\%$ ), siendo mayor el porcentaje de materia orgánica en S2RA (9,58%), seguido de S1RB (5,60%) y finalmente, S3PA (7,55%). Teniendo en cuenta esta misma clasificación, el contenido de fósforo fue clasificado como moderadamente bajo (10-15 mg/kg) para S1RB, moderadamente alto (21-25 mg/kg) para S3PA y muy alto ( $> 36$  mg/kg) para S2RA. En general, los tres tipos de suelos mostraron un alto contenido de NTK ( $> 0,221\%$ ) y bajo contenido de amonio, pero para los nitratos los suelos S1RB y S2RA presentaron un contenido medio y el suelo S3PA un contenido bajo. Al relacionar los resultados de las características fisicoquímicas iniciales encontradas para los tres tipos de suelo, se esperaría que la transferencia de nutrientes desde el suelo hacia la columna de agua sea mayor para el suelo S2RA, puesto que se verá favorecida por el mayor contenido de materia orgánica y el tipo de textura que presenta.

### 3.2. Variables fisicoquímicas en el agua

En la Tabla II se encuentran los valores máximos, mínimos y promedios para las variables de pH, oxígeno disuelto y potencial redox, los cuales se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas en la columna de agua en los ensayos en batch. En general, para los tres tipos de suelo no se presentaron grandes fluctuaciones en el valor del pH, teniendo un valor promedio de  $6,61 \pm 0,05$  para todos los experimentos. Por otra parte, las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) variaron durante el experimento, pero de acuerdo con los valores promedios obtenidos para los tres tipos de suelo, lo hicieron alrededor de las condiciones anóxicas (1,78 mg/L - 2,97 mg/L). En forma general, el OD fue disminuyendo a lo largo del periodo de análisis, situación debida a la demanda de oxígeno ejercida por la degradación de la materia orgánica presente en los tres tipos de suelo. Sin embargo, como el suelo S2RA registró un mayor contenido de esta, sus valores de OD medidos fueron más bajos respecto a los otros suelos. En cuanto al potencial redox, los valores fueron positivos al inicio de los experimentos y luego negativos durante el transcurso del periodo de estudio, alcanzando valores mínimos de -274,00 mV para S1RB, -252,80 mV para S2RA y -282,00 mV para S3PA. Este comportamiento se relacionó directamente con la disminución que presentó el oxígeno. De acuerdo con lo encontrado por Zhang y Wang [15], la variabilidad en los valores del pH y OD en la columna de agua de los ensayos desempeña un papel importante en la liberación de nutrientes del suelo al cuerpo de agua, ya que condiciona la solubilidad y, por lo tanto, la disponibilidad de estos.

**Tabla II.** Valores de las variables fisicoquímicas pH, oxígeno disuelto (OD) y potencial redox.

Suelo	pH			OD (mg/L)			Redox (mV)		
	Máx.	Mín.	Promedio	Máx.	Mín.	Promedio	Máx.	Mín.	Promedio
S1RB	7,22 ± 0,22	6,37 ± 0,01	6,62 ± 0,14	4,62 ± 0,21	0,72 ± 0,40	2,87 ± 0,12	268,75 ± 34,01	-276,00 ± 23,48	109,52 ± 29,21
S2RA	7,40 ± 0,02	6,39 ± 0,11	6,57 ± 0,04	3,26 ± 0,80	0,57 ± 0,10	1,78 ± 0,19	188,65 ± 18,60	-252,80 ± 22,43	67,43 ± 12,22
S3PA	6,90 ± 0,16	6,48 ± 0,05	6,64 ± 0,00	4,56 ± 0,08	1,18 ± 0,56	2,58 ± 0,36	235,30 ± 12,45	-282,00 ± 12,48	86,67 ± 18,54

### 3.3. Dinámica de la transferencia de nutrientes

En la Figura 1 se muestra el comportamiento del fosfato en el agua para los tres tipos de suelos. Los resultados muestran un incremento en la concentración de  $\text{PO}_4^{3-}$  en el agua contenida en el suelo S2RA que corresponde, a su vez, al suelo con mayor contenido de materia orgánica y fósforo disponible en su composición inicial y que, además, se caracterizó por una textura franco-arcillosa, situación que favorece los procesos de transferencia de nutrientes desde y hacia el medio. La menor concentración de fosfatos en el agua se dio para el suelo S3PA, lo que está relacionado con su textura arcillosa, la cual suele retener los nutrientes y no permite un adecuado proceso de intercambio suelo-agua.

Tanto para los ensayos con S1RB como S2RA se evidenció un incremento en la concentración de fosfato hasta el día 24 y, posteriormente, se dio lugar a una disminución. Este fenómeno se correlacionó con el pH, donde valores de pH por encima de 7 fueron determinados en los días 27 y 30, con valores de 7,17 y 7,40 para S1RB y 7,24 y 7,05 para S2RA respectivamente, para los demás días los valores de pH oscilaron entre 6,37 a 6,82. En el caso de los suelos, valores de pH por encima de 7 afectaron la disponibilidad del fósforo, ya que este se acompleja con el calcio presente, formando precipitados. Para los ensayos con el suelo S3PA, esta tendencia no estuvo tan marcada y las concentraciones de fósforo fueron muy constantes a lo largo de todos los ensayos, al igual que el pH, con valores que oscilaron entre 6,48 y 6,90.

Adicionalmente, se encuentra que existe una relación directa entre el comportamiento del oxígeno disuelto y la transferencia de fosfato desde el suelo hacia la columna de agua. A medida que se reducen las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica y se logran condiciones anóxicas, la concentración de fosfato se incrementa, lo cual puede evidenciarse en la Figura 1, donde para los tres tipos de suelo la máxima concentración de  $\text{PO}_4^{3-}$  se alcanza entre los días 21 y 24 con concentraciones de oxígeno entre 1,45 y 1,71 mg/L, comportamiento similar al encontrado por Zhu *et al.* [10], en cuyo estudio el fósforo influenció el cuerpo de agua durante los primeros 20 días. De acuerdo con Wetzel [1], las condiciones anóxicas asociadas a la reducción del oxígeno disuelto y de los valores del potencial redox favorecen la liberación de  $\text{PO}_4^{3-}$  desde el suelo.

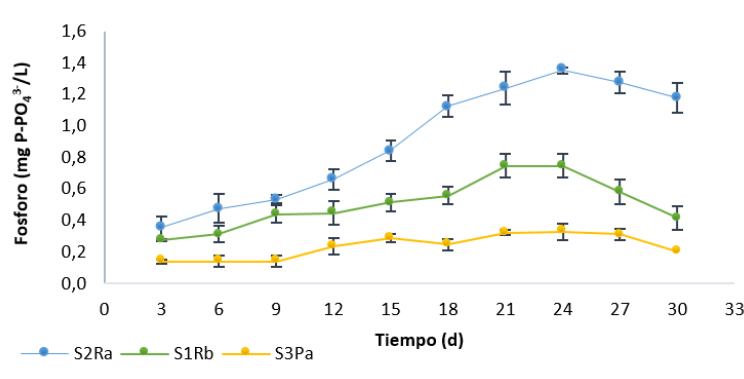
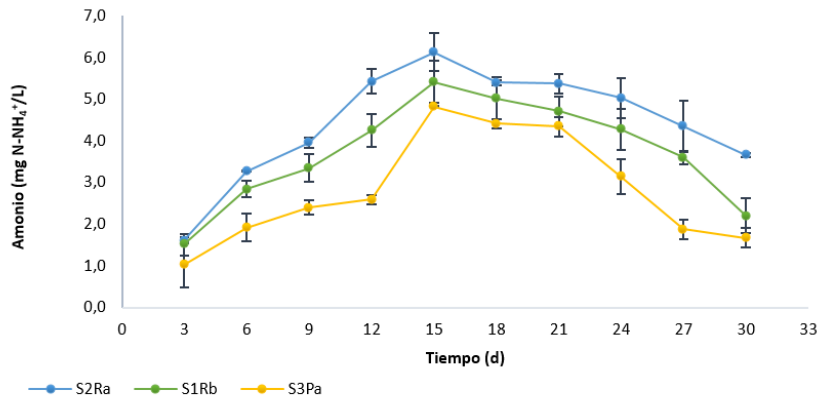


Figura 1. Concentración de fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) en la columna de agua de los ensayos *batch* para los tres tipos de suelo.



**Figura 2.** Concentración de nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) en la columna de agua de los ensayos *batch* para los tres tipos de suelos.

En cuanto al nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), se observó un comportamiento similar al descrito para el fosfato, es decir, se da en el transcurso del experimento un incremento progresivo de las concentraciones (Figura 2). Sin embargo, a diferencia de este, la máxima concentración de  $\text{NH}_4^+$  se presentó el día 15, mucho más rápido en comparación con el fosfato, y a partir de este empieza un decaimiento en la concentración de amonio en el agua para los tres tipos de suelos. La liberación de  $\text{NH}_4^+$  desde el suelo es el resultado de las bajas tasas de nitrificación biológica y asimilación de  $\text{NH}_4^+$ , lo cual se debe a la reducción en las concentraciones de oxígeno disuelto, de modo que al no favorecerse la oxidación del  $\text{NH}_4^+$  a nitritos y nitratos se da su liberación al medio acuoso [1], [15]. Esta situación se ve reflejada hasta el día quince, donde se alcanza el máximo de transferencia y predominio de las condiciones necesarias para llevar a cabo esta y, posteriormente, se da un decaimiento, indicando un cambio en la cinética de transferencia de la interfase suelo-agua.

Un pH entre 7 y 8 es requerido para un óptimo crecimiento de las bacterias nitrificantes [8], rango del cual se alejan un poco los valores promedio de pH obtenidos en los experimentos, lo que resulta en una baja tasa de conversión de  $\text{NH}_4^+$  a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). En estas condiciones anóxicas la tasa de mineralización del amonio excede a la de nitrificación [32].

Lo descrito previamente se ve reflejado claramente en la Figura 3, donde la transferencia del nitrato es mucho más lenta que la de nitrógeno amoniacal y tiende a ser más estable hasta aproximadamente el día quince. A partir de esta fecha, se incrementa el proceso de transferencia por la disminución del oxígeno disuelto, lo que favorece las condiciones anóxicas, alcanzándose la máxima concentración de  $\text{NO}_3^-$  al día 30 que fue la máxima experimentación.

Finalmente, de acuerdo con el comportamiento de la DQO en el agua (Figura 4), se observa que esta disminuye su concentración durante toda la experimentación, indicando procesos de degradación anóxicos y anaerobios de la materia orgánica presente. Comparando los tres tipos de suelo se encuentra que la mayor degradación de materia orgánica se dio en el suelo S3PA, suelo de características arcillosas.



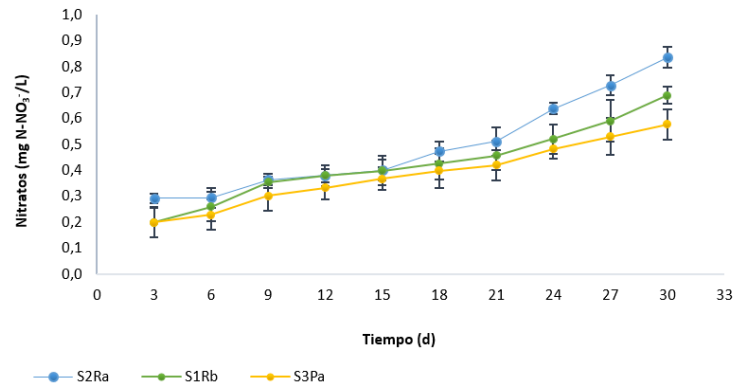


Figura 3. Concentración de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en la columna de agua de los ensayos *batch* en los tres tipos de suelo.

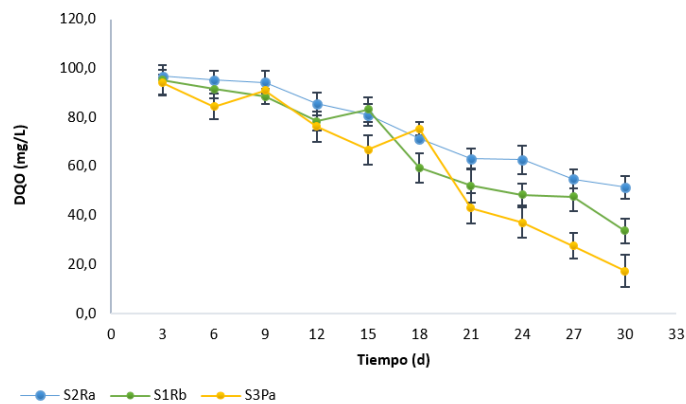


Figura 4. Concentración de la DQO en la columna de agua de los ensayos *batch* en los tres tipos de suelo.

### 3.4. Análisis de flujos

Se encontró que los tres tipos de suelo liberaron nitrógeno y fósforo (Figura 5), en función del gradiente de concentración que presentaron entre la columna de agua y el agua contenida en los poros del suelo. Este resultado está asociado con la mineralización de la materia orgánica y es similar a lo observado por [10]. Para el caso del amonio (Figura 5a), resultados de flujos fueron positivos hasta el día quince, con valores promedio de 0,0397 g/m<sup>2</sup>.d, 0,0450 g/m<sup>2</sup>.d y 0,0206 g/m<sup>2</sup>.d para los suelos S1RB, S2RA y S3PA, respectivamente. Posteriormente, los flujos fueron negativos, indicando flujos de amonio desde la columna de agua hacia los suelos, es decir, una retención de estos y en mayor proporción para el suelo S3PA, dadas sus características arcillosas. Este fenómeno corrobora lo encontrado en las concentraciones de amonio en la columna de agua, donde la cinética de transferencia disminuyó a partir del día quince. En el caso de los flujos de nitrato (Figura 5b), todos los flujos fueron positivos durante toda la experimentación, es decir, fueron desde el suelo

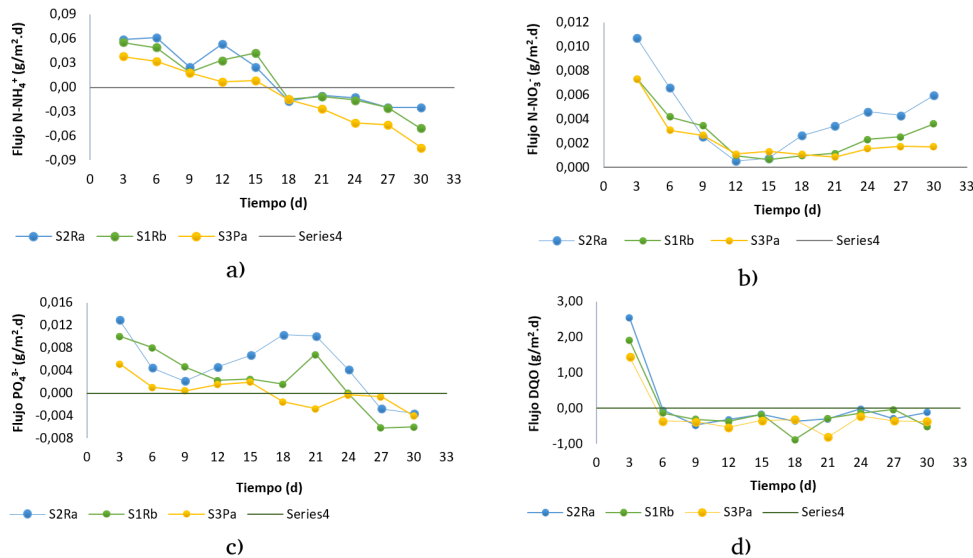


Figura 5. Flujos de nutrientes y materia orgánica en los ensayos en *bachth*.

hacia la columna de agua; sin embargo, en el día quince se evidencia una disminución de los flujos en los tres tipos de suelos, lo que coincide con los resultados de amonio y se asocia con procesos de desnitrificación posterior a los quince días por el agotamiento del oxígeno disuelto, lo cual favorece este proceso.

La Figura 5c muestra los flujos para el fosfato, en este caso se da una liberación hacia la columna de agua hasta el día 24 para los suelos S1RB y S2RA y, posteriormente, un cambio de flujo de la columna al suelo, lo que fue asociado con el aumento de pH. Esto favorece la formación de especies insolubles por el acomplejamiento del calcio presente en los suelos con los fosfatos. En este sentido, los suelos analizados se caracterizan por acumular sales solubles, principalmente calcio y magnesio, donde el contenido de calcio depende principalmente del contenido de arcilla, de la materia orgánica presente y de los procesos de meteorización y lixiviación. De este modo, la presencia de calcio permite dominar el complejo de intercambio a pH cerca de la neutralidad o ligeramente alcalino.

Finalmente, para la DQO (Figura 5d) se dio un fenómeno de transferencia desde la columna de agua al suelo durante todo el tiempo, ya que los resultados de flujo fueron negativos para los tres tipos de suelos estudiados. Este fenómeno da lugar a la formación de sumideros de carbono en los embalses, lo que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en los embalses. Los resultados de flujo permiten inferir que, en el caso del embalse influenciado por estas coberturas de suelo, el amonio podría tener la tendencia a liberarse en la columna de agua en los primeros días de inundación y, posteriormente, podría ocurrir un agotamiento. En el caso de los nitratos, el proceso puede ser a largo plazo por el proceso de desnitrificación. Para el caso del fosfato, la liberación a la columna de agua podría ser más extensa que el amonio, lo que contribuiría en mayor

grado con el aumento en la eutrofización. De igual forma, se concluye que los suelos analizados son una fuente de nutrientes y que pueden contribuir con los procesos de eutrofización en el embalse, estos mismos resultados fueron obtenidos por [33].

## 4. Conclusiones

Los ensayos *batch* bajo condiciones anóxicas mostraron que los tres tipos de suelo evaluados pertenecientes al vaso del embalse, previo al llenado de este, transfieren tanto nitrógeno como fósforo del suelo a la columna de agua, incrementando las concentraciones de estos nutrientes en el tiempo y asociado a fenómenos de degradación de la materia orgánica y a los cambios en el gradiente de concentración en la interfase suelo-agua. A su vez, se evidenció que la liberación tanto de fosfato como amonio estuvo asociada a la reducción en la concentración de oxígeno disuelto, por lo tanto, el flujo de nitrógeno amoniacal fue más alto en comparación con el flujo de nitrato, situación presentada por la inhibición en los procesos de nitrificación. Adicionalmente, la transferencia de nutrientes fue proporcional tanto a la concentración de materia orgánica como al tipo de textura del suelo, puesto que la transferencia fue mayor desde el suelo asociado a la cobertura vegetal rastrojo alto (S2RA), el cual presentó el mayor contenido de materia orgánica y una textura franco-arcillosa que favorece los procesos de intercambio suelo-agua. Con este estudio se concluye que los suelos evaluados son una fuente importante de nutrientes que puede afectar la calidad del agua del embalse en el tiempo posterior a su llenado y que junto con otras fuentes antropogénicas puede conducir a la eutrofización.

## Referencias

- [1] R. G. Wetzel, *Limnology: Lake and river ecosystem*. San Diego: Academic Press, 2001. ↑224, 230, 231
- [2] D. Cunha, M. Carmo y W. K. Dodds, “Trends in nutrient and sediment retention in Great Plains reservoirs (USA)”, *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 186, n.º 2, pp. 1143–1155, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3445-3> ↑224
- [3] S. Wang, W. Rao, J. Qian, C. Mao y K. Li, “Phosphorus species in bottom sediments of the Three Gorges Reservoir during low and high water level periods”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, pp. 17923–17934, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08348-5> ↑224, 225
- [4] M. Lopera, L. Oviedo, D. C. Rodríguez y G. Peñuela, “Aplicación de ensayos en discontinuo para la determinación de flujos de metano y dióxido de carbono en la degradación del material vegetal en el embalse Topocoro”, *Ingenierías USBMed*, vol. 7, n.º 2, pp. 67-73, 2016. <https://doi.org/10.21500/20275846.2598> ↑224
- [5] B. Lim, B. Ki y J. H. Choi, “Evaluation of Nutrient Release from Sediments of Artificial Lake”, *Journal of Environmental Engineering*, vol. 137, n.º 5, pp. 347–354, 2011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000337](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000337) ↑224
- [6] A. Jorcin y M. G. Nogueira, “Temporal and spatial patterns based on sediment and sediment–water interface characteristics along a cascade of reservoirs (Parapanema River, south-east Brazil)”, *Lakes and Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, vol. 10, n.º 1, pp. 1–12, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2005.00254.x> ↑224
- [7] J. R. Zeldis, C. Depree, C. Gongol, P. South, A. Marriner y D. Schiel, “Trophic Indicators of Ecological Resilience in a Tidal Lagoon Estuary Following Wastewater Diversion and Earthquake Disturbance”, *Estuaries and Coasts*, vol. 43, pp. 223–239, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00637-8> ↑224
- [8] K. Y. Gin y A. P. Gopalakrishnan, “Sediment Oxygen Demand and Nutrient Fluxes for a Tropical Reservoir in Singapore”, *Journal of Environmental Engineering*, vol. 136, n.º 1, pp. 78–85, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000119](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000119) ↑224, 225, 227, 231
- [9] R. Margalef, *Limnología*. Barcelona: Ediciones Omega S. A, 1983. ↑224

- [10] L. Zhu, C. Jiang, P. Zhang, D. Li y X. Zhu, "Eutrophication in the newly built Laohutan Reservoir during the initial impoundment period: the role of nutrient loading", *Environmental Earth Sciences*, vol. 74, n.º 6, pp. 4803–4812, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4469-5> ↑224, 225, 227, 230, 232
- [11] P. Tendaupenyu y C. H. D. Magadza, "Enrichment and geoaccumulation of metals in the superficial sediments of Lake Chivero, Zimbabwe", *Lakes and Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, vol. 24, pp. 275–286, 2019. <https://doi.org/10.1111/lre.12282> ↑224, 225
- [12] S. Rahutomo, J. L. Kovar y M. L. Thompson, "Inorganic and Organic Phosphorus in Sediments in the Walnut Creek Watershed of Central Iowa, USA", *Water, Air, and Soil Pollution volume*, vol. 229, n.º 72, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3721-5> ↑224
- [13] Y. Chen, L. Wang, T. Liang, J. Xiao, J. Li, H. Wei y L. Dong, "Major ion and dissolved heavy metal geochemistry, distribution, and relationship in the overlying water of Dongting Lake, China", *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 41, pp. 1091–1104, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0204-y> ↑224
- [14] Y. C. Wang, F. X. Niu, S. B. Xiao, D. F. Liu, W. Z., Chen, Y. Li y L. Wang "Phosphorus Fractions and Its Summer's Release Flux from Sediment in the China's Three Gorges Reservoir", *Journal of Environmental Informatics*, vol. 25, n.º 1, pp. 36–45, 2015. <https://doi.org/10.3808/jei.201400260> ↑224, 225
- [15] L. Zhang, S. Wang y Z. Wu, "Coupling effect of pH and dissolved oxygen in water column on nitrogen release at water–sediment interface of Erhai Lake, China", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 149, pp. 178–186, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.009> ↑224, 225, 229, 231
- [16] X. Liu, R. Watts, J. Howitt y N. McCasker, "Carbon and nutrient release from experimental inundation of agricultural and forested floodplain soil and vegetation: influence of floodplain land use on the development of hypoxic blackwater during floods", *Marine and Freshwater Research*, vol. 71, pp. 213–228, 2019. <https://doi.org/10.1071/MF18452> ↑225
- [17] M. W. Beutel, T. M. Leonard, S. R. Dent y B. C. Moore, "Effects of aerobic and anaerobic conditions on P, N, Fe, Mn, and Hg accumulation in waters overlaying profundal sediments of an oligo-mesotrophic lake", *Water Research*, vol. 42, n.º 8–9, pp. 1953–1962, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.11.027> ↑225
- [18] M. Ruiz, D. C. Rodríguez, E. Chica y G. Peñuela, "Calibration of two mathematical models at laboratory scale for predicting the generation of methane and carbon dioxide at the entrance point of the Chucurí river to the Topocoro Reservoir", *Ingeniería y Competitividad*, vol. 21, n.º 1, pp. 11–22, 2019. <http://dx.doi.org/10.25100/iyv.v20i1.7651> ↑225
- [19] International Hydropower Associate, *GHG measurement guidelines for freshwater reservoir*. London: International Hydropower Associate, 2010. ↑225
- [20] IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, "Intergovernmental Panel on Climate Change", IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. ↑225, 226
- [21] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, "Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa- carbono en Colombia", Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010. ↑225, 226
- [22] S. A. Orrego, J. I. Del Valle y F. H. Moreno, *Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2002. ↑225, 226
- [23] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, "Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000". [En línea]. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf> ↑226, 228, 229
- [24] Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], *Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos*. Bogotá D.C.: IGAC, 2006. ↑227
- [25] J. E. Rodríguez, D. C. Rodríguez y G. A. Peñuela, "Comparison of in Batch Aerobic and Anaerobic Processes for the Degradation of Organic Matter in a Tropical Reservoir", *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29, n.º 54, 2020. <https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10892> ↑227
- [26] R. Baird, A. Eaton y E. Rice (Eds.), *Standard methods for examination of water and wastewater*. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association y Pollution Control Federation, 2017. ↑227
- [27] C. Zago, G. Capodaglio, S. Ceradini, G. Ciceri, L. Abelmoschi, F. Soggia y G. Scarponi, "Benthic fluxes of cadmium, lead, copper and nitrogen species in the northern Adriatic Sea in front of the River Po outflow, Italy", *Science of the Total Environment*, vol. 246, n.º 2–3, pp. 121–137, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00421-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00421-0) ↑227
- [28] R. L. Anckerman, "Soil and plant analysis. Agricultural Laboratories". [En línea]. Disponible en: <http://>

- [www.fao.org/3/ar117e/ar117e.pdf](http://www.fao.org/3/ar117e/ar117e.pdf) ↑228, 229
- [29] R. Campillo y A. Sadzawka, “La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados”. [En línea]. Disponible en: [https://puntoganadero.cl/imagenes/upload/\\_5cc0957281b85.pdf](https://puntoganadero.cl/imagenes/upload/_5cc0957281b85.pdf) ↑228
- [30] USDA, “Guía para la evaluación de la calidad y salud del Suelo”. [En línea]. Disponible en: [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf) ↑228
- [31] O. Casanova, “Introducción a la ciencia del suelo. Consejo de desarrollo científico venezolano”, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH-UCV) de la Universidad Central de Venezuela, 2002. ↑228
- [32] W. H. Nowlin, J. L. Evarts y M. J. Vanni, “Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir”, *Freshwater Biology*, vol. 50, n.º 2, pp. 301–322, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01316.x> ↑231
- [33] R. A. Vollenweider, “Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication”, Technical report, Organisation for Economic Co-operation and Development, 1968. ↑234

---

### Tatiana Arias

Ingeniera Sanitaria y Ambiental, Universidad de Antioquia; Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GD-CON).

Correo electrónico: [tatiariasp0208@gmail.com](mailto:tatiariasp0208@gmail.com)

---

### Diana Catalina Rodríguez Loiza

Doctora en Ingeniería, Universidad de Antioquia; Magister en Ingeniería, Universidad de Antioquia; Ingeniera Sanitaria, Universidad de Antioquia; Profesora Asociada de la Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental; Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GD-CON).

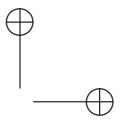
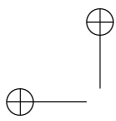
Correo electrónico: [diana.rodriguez@udea.edu.co](mailto:diana.rodriguez@udea.edu.co)

---

### Gustavo Peñuela

Doctor en Química Ambiental, Universidad de Barcelona; Magister en Ciencias Químicas, Universidad Nacional; Químico, Universidad Nacional; Profesor Titular de la Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental; Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GD-CON).

Correo electrónico: [gustavo.penuela@udea.edu.co](mailto:gustavo.penuela@udea.edu.co)



Research

REVISTA  
Ingeniería

## Recovery and Incorporation of expanded polystyrene Solid Waste in Lightweight Concrete

*Recuperación e incorporación de residuos sólidos de poliestireno expandido en concreto liviano*

María. P. Espinoza-Merchán<sup>1</sup>, Laura. J. Torres-Parra<sup>1</sup>, Nicolas. Rojas-Arias<sup>2</sup>, Pablo. M. Cocha-Vesga<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Boyacá, Tunja-Boyacá, Colombia, <sup>2</sup>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja-Boyacá, Colombia, <sup>3</sup>Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Materiais -DeMa, São Carlos-São Paulo, Brasil.

Correspondence e-mail: nicolas.rojas@uptc.edu.co and pablo.coha@uptc.edu.co

Recibido: 11/12/2020. Modificado: 10/09/2020. Aceptado: 17/09/2020.

### Abstract

**Context:** The high consumption of parts made from expanded polystyrene (EPS) generates environmental problems when disposed. Due to its low density and the low possibility of being utilized in other applications after its disposal, it is necessary to generate an alternative for the recovery and application of this type of waste. This work aims to generate an alternative in the application of EPS waste, particularly as a coarse aggregate in the manufacturing of lightweight concrete.

**Method:** This study used discarded EPS containers as raw material. The material was cleaned, crushed and subsequently reduced in volume by applying acetone, generating pieces of polystyrene (R-PS) to be applied as a coarse aggregate for the manufacturing of lightweight concrete in different proportions. In addition, the pieces were subjected to a chemical attack process in order to observe their behavior.

**Results:** The results show the degree of volume reduction of the EPS pieces by using different acetone ratios, establishing the best degree of reduction (in volume) of this material. Likewise, chemical attack tests show the behavior of R-PS against different agents in R-PS samples. Meanwhile, the failure tests on different concrete samples determine the best R-PS ratio as coarse aggregate for the manufacturing of lightweight concrete.

**Conclusions:** The data obtained in this study show that the application of acetone on EPSW samples reduces its volume by up to 55%. Concrete failure tests show that an optimum P-RS addition value, to be used as an aggregate in the manufacturing of lightweight concrete, is 7%. This improves its resistance to chemical agents and weight reduction without significantly reducing the mechanical properties of concrete.

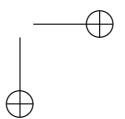
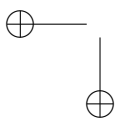
**Keywords:** Environmental pollution, lightweight concrete, polystyrene (R-PS), waste expanded polystyrene.

**Language:** English

Open access



Cite this paper as: M. P. Espinoza-Merchán, L. J. Torres-Parra, N. Rojas-Arias, P. M. Cocha-Vesga "Recovery and Incorporation of expanded polystyrene Solid Waste in Lightweight Concrete", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 237-249 (2020).  
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.15681>



### Resumen

**Contexto:** El alto consumo de piezas fabricadas con poliestireno expandido (EPS, por sus siglas en inglés) genera problemas ambientales al desecharse debido a su baja densidad y la baja posibilidad de ser utilizado en otras aplicaciones posteriores a su desecho, lo cual hace necesario generar una alternativa de recuperación y aplicación de este tipo de residuos. Este trabajo tiene como objetivo generar una alternativa en la aplicación de residuos de EPS, en este caso, como agregado grueso en la fabricación de concreto liviano.

**Método:** Este estudio utilizó recipientes de EPS desechados como materia prima. El material fue limpiado, triturado y posteriormente reducido su volumen mediante la aplicación de acetona, generando piezas de poliestireno (R-PS) para ser aplicado como agregado grueso para la fabricación de concreto liviano en diferentes proporciones. Además, las piezas fueron sometidas a un proceso de ataque químico para ver su comportamiento.

**Resultados:** Los resultados muestran el grado de reducción de volumen las piezas de EPS mediante el uso de diferentes relaciones de acetona, estableciendo el mejor grado de reducción (en volumen) de este material. Asimismo, las pruebas de ataque químico muestran el comportamiento del R-PS ante diferentes agentes en las muestras de R-PS y las pruebas de falla sobre las diferentes muestras de concreto determinan la mejor relación R-PS como agregado grueso para la fabricación de concreto liviano.

**Conclusiones:** Los datos obtenidos en este estudio muestran que la aplicación de acetona sobre las muestras de EPSW logra reducir su volumen hasta en un 55 %. Las pruebas de falla en concretos muestran que un valor de adición de P-RS óptimo a utilizar como agregado en la fabricación de concreto liviano es del 7 %, mejorando su resistencia ante agentes químicos y reducción de peso, sin reducir las propiedades mecánicas del concreto de forma significativa.

**Palabras clave:** Concreto liviano, contaminación ambiental, poliestireno (R-PS), residuos de poliestireno expandido.

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

One of the most consumed materials in the world is expanded polyethylene (EPS), used in various commercial and domestic applications. Due to its high chemical stability preventing the generation of odours or flavours, this material is widely used in food [1]. The chemical stability of the material prevents its degradation [2]. However, this material has a low percentage of recovery and is not recyclable. In addition, it presents a very low density, generating large volumes of non-biodegradable waste, which increases the cost of transport and storage, reduces the useful life of landfills and also generates environmental and health problems [3]–[5]. Colombia has generated various strategies for mitigation and prohibition in the use of EPS [6]–[9]. However, these strategies have had little acceptance by society, specifically the proposal of laws and regulations to prohibit the use of products made with this material and the non-use of reusable or biodegradable food containers [10]. This problem generates the need to establish an alternative use of EPS waste (EPSW).

There are several methods for recycling EPS for construction [11]–[13]. These methods are expensive, however and generate environmental effects. Some friendly methods which have been developed focus on the production of oils from EPSW. These processes, however, generate secondary hazardous waste that may have a greater impact than unchanged EPSW [14]. These solid wastes (with a higher density due to their compaction by the addition of methanol) please the reduction vo-

lumes conventionally occupied by this type of materials. Unfortunately, the final products continue to have a very low density, so their application is better served as an aggregate in the manufacturing of lightweight concrete, which generates up to 10 % weight reduction.

In the manufacturing of lightweight concrete, the use of artificial light aggregates from solid waste favours the possibility of high-rise building construction and prefabricated structures [15]–[17] without significantly altering the properties of the material, while also maintaining the concrete elastic modulus withing specifications [16], [18] and a reasonable resistance level [17], [19]. Moreover, the application of solid waste and garbage in the manufacturing of concrete also provides a favourable solution for environmental protection [20], [21].

This work reports a simple and low-cost method for the recycling of EPSW and its implementation in the manufacturing of lightweight concrete. This develops a solid alternative for the recycling of these solid wastes. The tests in this study were carried out by dissolving EPSW in different weight ratios of acetone for the manufacturing of recovered polystyrene particles (R-PS). Recycled EPSW and R-PS were applied in different proportions as aggregate for the manufacturing of lightweight concrete and for conventional concrete samples.

## 2. Materials and experimental details

The raw material used in this study were EPS cups that were formerly used for hot drinks on a college campus. They were recovered from ecological points arranged in coffee stations at of the University of Boyacá, Colombia with coordinates 5°34'03, 86" N and 73°20'17, 23" W, located at 2775 m.a.s.l. The EPS cups were first cleaned to remove solid and liquid waste from food and beverages and then subsequently dried at 115°C until a constant material weight was obtained.

The collected EPS cups were taken through a manual size reduction process to obtain of 1-5 cm x 1-5 cm average size. The obtained EPSW pieces were dissolved in acetone at ratios of 0:.25, 0:.50, 0:.75, 1 and 1:5 g of EPSW per mL of acetone in order to obtain the R-PS. The behaviour of the samples was observed for one month in order to track changes in the volume of the material. The data obtained during the process were used to determine the best relationship which produces sand aggregates that will be added to the lightweight concrete samples. Subsequently, the samples of crushed EPSW and R-PS were exposed to solutions of 1M HCl, 1M HNO<sub>3</sub>, 1M Na (OH) and CH<sub>3</sub>COOH for a period of one week to determine their stability against chemical agents.

The crushed EPSW and R-PS samples were added in concrete mortars (10 cm in diameter and 20 cm high) with a 7, 14 and 28 percent volume of concrete, subject to undergo impact tests until a fracture of the pieces was initiated to recover all of the R-PS pieces, which were added to the concrete for visual inspection. Compression tests were performed using CONTROLS CUPTECH equipment, specified for compression rupture tests, maintaining a load capacity of 100 kN with data collection at intervals of 1 kN and at a speed of 0,2 to 0,3 s. Tests were performed for conventional concrete samples and concrete samples with the addition of both crushed EPSW and R-PS [22]. Additionally, the mechanical resistance of the dissolved EPSW and the conventional aggregate used in concrete was carried out by means of the Micro-Deval test on Dirimpex S.A.A. equipment,



model H38721N. This was accomplished by applying 2 L of water and an abrasive load of 5 kg of steel-balls with a diameter of 9,5 cm [23], [24]. The tests were conducted over a period of 2 h at 100 rpm. Four replicates were performed for each trial in this study. The data obtained were averaged.

### 3. Results

#### 3.1. Raw material

Figure 1 shows the amount of material collected in a period of six months within a university plant. Due to holiday periods within the academic period, there are weeks where a solid waste collection of EPS was not obtained. Similarly, the management of solid waste from the EPS is associated with secondary materials that must be removed prior to the proposed treatment of the EPSW. Figure 2 shows the percentage of materials associated with the EPSW during its disposal in this study.

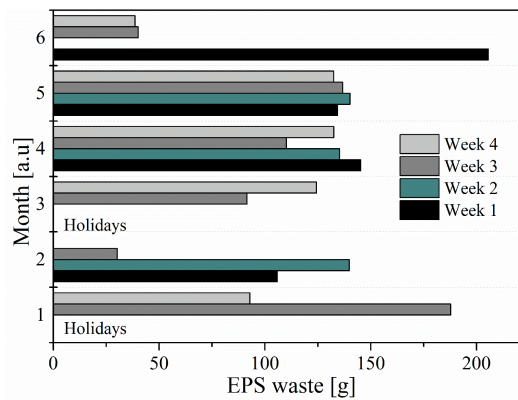
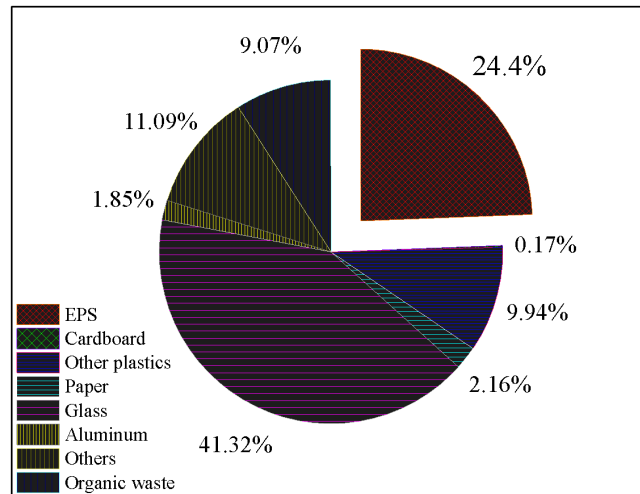


Figura 1. EPSW collected during an academic semester within the University of Boyacá, Colombia..

Table I shows the specific weight of the EPSW waste collected during one academic semester. The specific weight was obtained using a 2 L Beaker, adding the 1-5 cm x 1-5 cm EPSW samples, first without generating any compaction effort followed by manual compaction to two different loads, which generated a densification process [25].

Table I. Apparent density of EPSW collected during a semester without and with compaction process.

Month [a.u.]	Weight [kg]	Apparent density [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]		
		Without compaction	compaction 1	compaction 2
1	0,28 ± 0,04	11,64 ± 3,4	24,61 ± 4,7	30,84 ± 5,6
2	0,28 ± 0,04	11,65 ± 3,4	24,65 ± 4,8	30,68 ± 5,5
3	0,22 ± 0,04	11,67 ± 3,4	24,82 ± 5,0	30,84 ± 5,6
4	0,52 ± 0,07	11,66 ± 3,4	24,68 ± 4,8	30,79 ± 5,5
5	0,54 ± 0,07	11,64 ± 3,4	24,72 ± 4,9	30,90 ± 5,6
6	0,28 ± 0,04	11,65 ± 3,4	24,72 ± 4,9	30,90 ± 5,6



**Figura 2.** Weight percentage of solid waste generated within the University of Boyacá, Colombia, during an academic semester.

Next, the EPSW samples were subjected to a drying process in an electric oven at 1150°C until a constant weight of EPSW was obtained. The data obtained show a moisture percentage of 6.6 % by weight. This percentage is mainly due to the remaining liquid deposited in the vessels after being cleaned. The data favours the formation and proliferation of microorganisms that can cause environmental and health problems [4].

### 3.2. EPS dissolution

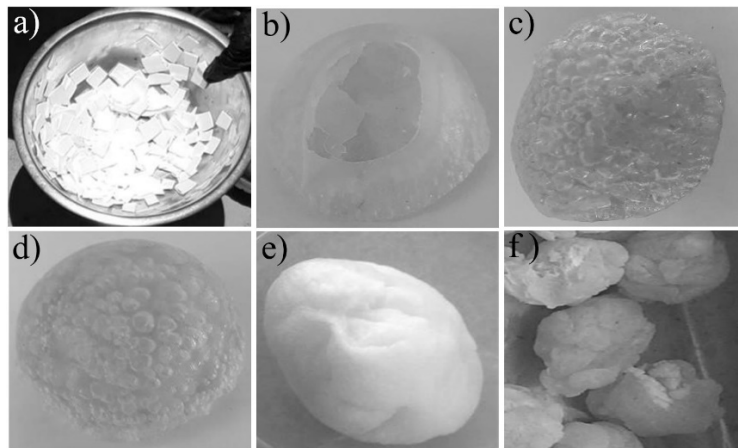
Figure 3 shows the behaviour of the EPSW samples when dissolved with different acetone ratios. The images allow for observation of the physical behaviour obtained in the material (when subjected to acetone in different percentages). The acetone was observed at room temperature during a period of 30 days, where it naturally dispersed and disappeared over time. The best characteristics are observed on sample 4 (Figure 3-e) with a ratio of 1g of EPSW per mL of acetone. For the other ratios, the presence of porosities and irregularities (which could affect the performance of the material in concrete formulations) were observed.

### 3.3. R-PS characterisation

Table II shows the density variation of the EPSW before and after it was subjected to dissolution in acetone, as well as its behaviour when exposed to chemical agents.

### 3.4. Application of EPS and R-PS in concrete

Tables III and IV show the relationships used for the manufacturing of conventional concrete and lightweight concrete with the addition of crushed EPSW and R-PS and the densities obtained for each of the manufactured samples. Figure 4 presents the data obtained in the compression test (on



**Figura 3.** Samples of EPSW dissolved in acetone with different weight ratios of EPSW/Acetone. In a) undissolved EPSW, b) 0,25:1 ratio, c) 0,5:1 ratio, d) 0,75:1 ratio, e) 1:1 and f) 1.5:1 ratio.

**Table II.** Behaviour of the EPS and EP before exposure to chemical agents.

Reagent	Feature	EPSW	R-PS
	Density		0,06
	Weight difference [ % ]		
HCL		2,82	0
HNO <sub>3</sub>		4,41	10,22
Na(OH)		3,5	1,42
CH <sub>3</sub> COOH		1,43	2,88
ACPM (Diesel)		16,03	1,15

standard and concrete failed samples) with a 7, 14 and 28 percent volume addition of crushed EPS and R-PS for 7, 14 and 28 days of sample curing.

**Table III.** Material ratios for the concrete samples.

Raw material	Conventional concrete	Lightweight concrete with EPS			Lightweight concrete with R-PS		
		7 %	14 %	28 %	7 %	14 %	28 %
Cement [g]	2448,69	2448,69	2448,69	2448,69	2448,69	2448,69	2448,69
Sand [g]	2630,39	2630,39	2630,39	2630,39	2630,39	2630,39	2630,39
Coarse Aggregate[g]	7111,45	7095,37	7079,30	7047,14	6918,52	6725,59	6332,70
Water [ml]	1408,00	1408,00	1408,00	1408,00	1408,00	1408,00	1408,00
Accelerating [ml]	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60
EPS [g]	0,00	16,08	32,16	64,31	0,00	0,00	0,00
R-PS [g]	0,00	0,00	0,00	0,00	192,93	385,86	771,79

Table IV. Densities obtained for the concrete samples.

Sample	Dosage	Weight [kg]	$\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
Standard concrete		3,9	2413,94
	7 %	3,73	2306,4
	14 %	3,63	2244,59
Concrete with EPS	28 %	3,48	2153,12
	7 %	3,84	2377,06
	14 %	3,66	2262,31
Concrete with R-PS	28 %	3,53	2187,32

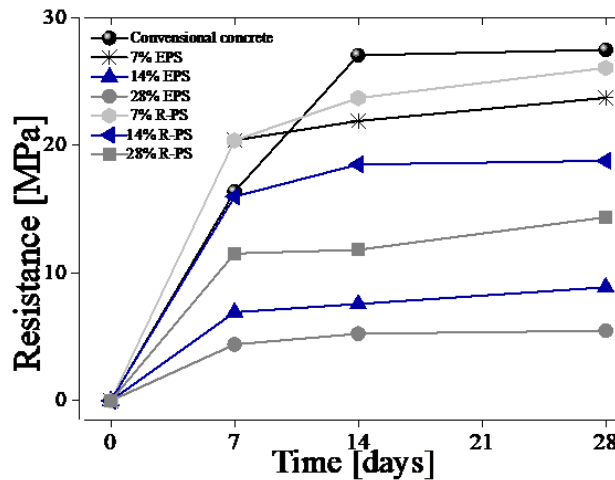


Figura 4. Compressive strength for the concrete samples.

## 4. Analysis

The results show that about a quarter of the weight of solid waste (collected in cafeterias of the university in a conventional academic period) corresponds to EPS cups used for hot drinks at the university. This represents 50 % of the occupied volume of these materials in containers designated for the storage of solid waste within the university. This also demonstrates that the material is associated with other foreign materials, which hinders the recovery process of EPSW. However, as it can be seen in Table V, the compaction of the material inside the intended containers allows for the reduction of up to 28 % of the volume occupied by discarded EPS cups (without any prior compaction process).

The dissolution of the EPS cups, with the addition of acetone, favours the compaction of these residues by means of a physicochemical process. This allows for the generation of a compact material without any need to apply forces in the process. However, the physical data obtained in the study

**Table V.** Volume occupied by solid wastes recovered from EPS before and after a process of compacting EPSW.

Component	Weight	Busy volume [ % ]		
		Uncompacted	Compacted 1	Compacted 2
EPSW	24,40	50,27	32,31	27,64
Other plastics	9,94	0,26	0,36	0,38
Sheets	2,16	0,58	0,78	0,84
Paperboard	0,17	0,08	0,11	0,12
Aluminum	1,85	0,02	0,02	0,02
Glass	41,32	0,40	0,54	0,58
Organic waste	9,07	21,77	29,64	31,68
Others	11,09	26,62	36,24	38,74

show that the variation in the addition of acetone (for the material compaction process) physically affects the final product in its density and bubbles formation. Therefore, it can be observed that the best behaviour obtained is generated by a 1:1 ratio of EPSW pieces and acetone, obtaining a more homogeneous material without the presence of air cavities that can negatively affect the mechanical behaviour of the R-PS. Ultimately, this allows for greater use of EPSW during the previously stated process.

In addition, the data obtained show a variation in the specific weight samples of R-PS in relation to time, decreasing by  $25,8 \pm 5 \%$  for a period of 30 days. Figure 5 shows the change in the mass of a sample of R-PS with a 1:1 ratio over a period of 30 days, as the acetone naturally evaporates at room temperature. A significant decrease in weight can be observed in the first 5 days, with a loss of  $15 \pm 3 \%$  of its initial mass. This data corresponds to the presence of acetone as a remnant within the sample, deposited within the pores of the R-PS and delaying the process of the evaporation of acetone within the R-PS samples. This weight reduction can be taken into account for the process of utilising R-PS as coarse aggregate in the manufacturing of concrete. Specific consideration happens during the preparation of the raw material and applying drying times of the samples prior to their application.

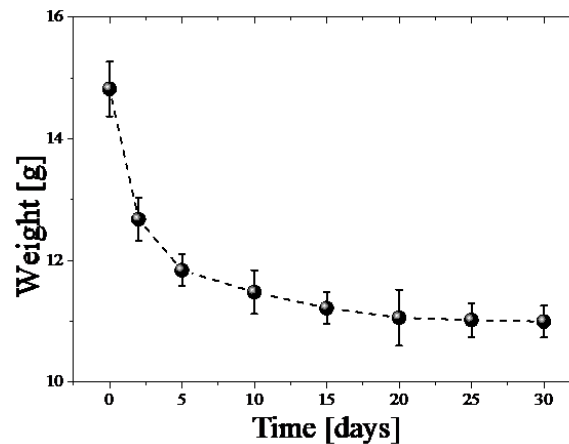
**Figure 5.** Variation in time of the specific weight of EPSW dissolved in acetone.

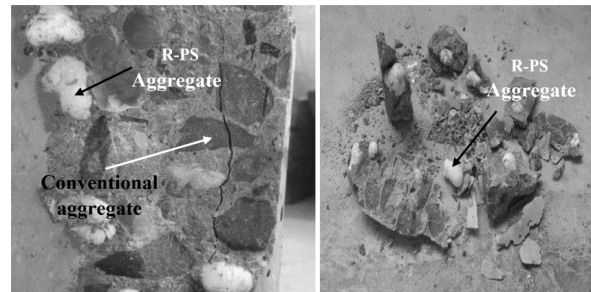
Table II shows the variation in density and the fire behaviour for samples of crushed EPS and R-PS. A slight increase in the density of the material is observed when exposed in acetone, in addition to presenting a slow burning process in relation to the crushed EPS. Combustion tests showed that samples of crushed EPSW tend to disintegrate rapidly, generating a greater amount of airborne particles (or ashes), which can be considered pollutants due to incomplete combustion. This can be evidenced visually with the detachment of soot particles in the process, involving a risk for the environment [4]. Furthermore, it can also affect some structures that are made from it, which may come into contact with fire, resulting in a physical and mechanical change in the initial properties of this material [26].

Samples subjected to combustion processes have a combustion rate similar to that of crushed samples. However, R-PS samples have a longer burning time, a longer generation of solid waste after the process and more suspended particles. This allows the R-PS to have a greater applicability in its addition as a coarse aggregate in concrete, in relation to the EPSW, having a better behaviour in the event of a fire. The addition of R-PS, combined with the addition of other solid plastic waste such as cable residues and ethylene vinyl acetate, favours an increase in the thermal conductivity and mechanical properties of the concrete. Therefore, the addition of other types of waste solids within the manufacturing of concrete would favour these properties [21].

The temperature stability data obtained at 180°C for a period of 5 min, show that the material presents a change in its physical appearance, forming a weak and fractured paste, in addition to a decrease in volume, which assumes an advantage for storage processes. The RPS samples submitted to this process show an expansion of their dimensions, increasing the volume without losing much of its properties. However, this characteristic can have negative consequences, due to the possibility of cracking in materials and structures where it is applied because of extreme thermal changes. These are unlikely to be obtained in a conventional event such as a fire, because the material will not present a direct contact to the fire, which allows a greater resistance towards this type of conditions.

The data obtained from the impact resistance in concrete specimens, with the addition of crushed EPSW and R-PS, reflect that the application of crushed EPSW or R-PS in concrete does not show cracking (by absorbing much of the energy supplied within the sample) [27]. The thick aggregate, conventionally used for the manufacture of structural concrete, shows significant fractures due to impact resistance tests (Fig. 6). This characteristic, due to the lack of adhesion between the R-PS and the cement, allows the achievement of a better behaviour of the concrete before impact efforts. This favours the manufacturing of a lighter concrete as a result to the addition of EPSW as a light-weight aggregate [28], [29].

The data obtained during the behaviour test of crushed EPSW and R-PS (before the exposure of chemical agents) demonstrates that the material exposed to solutions of acids and bases did not show significant physical changes or traces of disintegration by the material. This is because the material needs polar solvents such as acetone to generate a physical change or dissolution of the material. Therefore, this material has a good utility in the presence of highly corrosive chemical agents, with an optimal performance in the applications commonly used for concrete [30], [31].



**Figure 6.** Concrete cracking after impact tests. Breakdown of conventional coarse aggregate grains is observed while the light R-PS aggregates do not show cracking.

The resistance tests of the aggregate show that  $78,01 \pm 3,5 \%$  of the aggregate of R-PS has a significant percentage of fractured faces, while coarse aggregate samples (conventionally used in the manufacturing of concrete) have a high degree of cracked material with a value close to  $94 \pm 4,2 \%$ . This shows that the R-PS aggregate has a greater resistance to cracking and wear of the material compared to the thick aggregate conventionally used in the manufacturing of concrete, with an overall improvement of  $21,09 \pm 5,3 \%$ . Similarly, the abrasion test shows a loss of  $3,43 \pm 1,4 \%$  by weight in the R-PS sample, while the conventional aggregate sample reflects a loss of  $25,87 \pm 4,86 \%$  of the initial weight, indicating that the aggregate of R-PS has greater durability, allowing less wear in abrasive conditions. This allows for the presence of greater stability in the material within its application for the manufacturing of concrete and its application in extreme environments, with the presence of highly toxic or abrasive environments.

Compression tests were performed on conventional concrete and dosed concrete specimens with 7, 14 and 28 percent crushed EPSW and R-PS, respectively, in periods of 7, 14 and 28 days of curing. The data obtained show that the samples of concrete dosed with 7 % by volume of crushed EPSW and R-PS have a compressive strength similar to the conventionally used concrete samples, reaching a resistance close to 27 MPa,  $21 \pm 4 \%$  less than the data obtained for conventional concrete [18], [29], [32]. The addition of 14 and 28 % by volume of EPSW, however, decreases the mechanical properties of the concrete by  $72,5 \pm 8,5$  and  $82,6 \pm 9 \%$  respectively and  $35,6 \pm 6$  and  $55,9 \pm 7 \%$  for concrete samples dosed with R-PS. This allows a premise to be established that an excessive addition in the volume of EPSW or R-PS within concrete drastically reduces the mechanical resistance of the material. It also means that, with low material dosages, there is a better behaviour of the concrete with the application of R-PS [33], [34]. The R-PS samples, used as coarse aggregate in the manufacturing of concrete, show poor adhesion with the cement. This is due to the physical characteristics of the material and this factor must be improved in order to obtain better mechanical strength. The application of 7 % of R-PS in a cubic metre of concrete will use 27,3 kg of EPSW. This is equivalent to 455 m<sup>3</sup> of this waste that would not go into a landfill.

## 5. Conclusions

As a general analysis of the results obtained from this study, the implementation of R-PS not only simulates the mechanical properties of concrete, but it also improves other properties such as re-

sistance and corrosion by exposure to chemical and corrosive agents. The implementation of R-PS also enhances weight reduction during the manufacturing of the concrete, favouring the possibility that the application of R-PS as a coarse aggregate for the manufacturing of lightweight concrete is valid. However, an excessive application of R-PS as a dispenser in concrete affects the mechanical properties of the material, which is why a low percentage of R-PS application is recommended as a coarse aggregate for the manufacturing of lightweight concrete.

Furthermore, the addition of acetone in EPSW as a dissolving agent allows a volume reduction of the material by 55 %, which reduces the space conventionally required for storage inside sanitary landfills, thus increasing its useful life. In addition, the treatment of EPSW to obtain R-PS allows an application of this material to be generated. This favours the processes of the storage and disposal of solid EPSW, favouring the recovery and recirculation of these materials as an environmental remediation mechanism. A 7 % application of R-PS, in particular, could reduce up to 455 m<sup>3</sup> occupied by this type of waste in landfills, taking into account calculations obtained from the occupied volume of EPSW without the application of acetone.

## Referencias

- [1] K. Marsh and B. Bugusu, "Food Packaging Roles, Materials, and Environmental Issues". *Journal of Food Science*, vol. 72, no. 3, pp. R39–R55, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00301.x> ↑238
- [2] A. Ammala et al., "An overview of degradable and biodegradable polyolefins", *Progress in Polymer Science*, vol. 36, no. 8, pp. 1015– 1049, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.12.002> ↑238
- [3] A. Cáceres, M. Sánchez-Soto, L. Maspoch, M. Sánchez-Hernández and A. Sánchez-Rojo, "Desarrollo de un Proceso de Reciclaje para la Fracción Mixta de Residuos de Plástico, Provenientes de Plantas de Separación Selectiva", in *II Congreso UPC Sostenible*, Barcelona, 2015. ↑238
- [4] S. Ross and D. Evans, "The environmental effect of reusing and recycling a plastic-based packaging system", *Journal of Cleaner Production*, vol. 11, no. 5, pp. 561–571, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00089-6) ↑238, 241, 245
- [5] C. H. Quintero-Peña, "Reciclaje termo - mecánico del poliestireno expandido (Icopor), como una estrategia de mitigación de su impacto ambiental en rellenos sanitarios", M.S. thesis, Universidad de Manizales, Manizales, 2013. ↑238
- [6] Revista Semana, "¿Por qué cada vez más ciudades prohíben el icopor?". [Online]. Available: <https://www.semana.com/vida-moderna/articulo/por-que-cada-vez-mas-ciudades-prohiben-el-poliestireno/433365-3> ↑238
- [7] I. Junca, "El icopor, una amenaza ambiental creciente para Bogotá". [Online]. Available: <https://www.elsespectador.com/noticias/bogota/el-icopor-una-amenaza-ambiental-creciente-para-bogota/> ↑238
- [8] L. Lizarazo, "Polémica por proyecto de ley que quiere prohibir el icopor". [Online]. Available: <https://www.portafolio.co/negocios/el-proyecto-de-ley-que-busca-prohibir-el-uso-del-icopor-508827> ↑238
- [9] S. Angulo, "ICOPOR: El útil material que está lleno de problemas". [Online]. Available: <https://www.enter.co/cultura-digital/ciencia/icopor-el-util-material-que-esta-lleno-de-problemas/> ↑238
- [10] M. Martínez, "Proyecto de Ley 2017: Por medio del cual se prohíbe la utilización del poliestireno expandido (icopor) en actividades de comercialización de alimentos, se ordena la implementación de un Plan Nacional de Reciclaje del Icopor de uso industrial y se dictan otras disposiciones". [Online]. Available: <http://leyes.senado.gov.co/proyectos/index.php/textos-radicados-senado/p-ley-2017-2018/845-proyecto-de-ley-005-de-2017> ↑238
- [11] J. Sierra-Pérez, I. López-Forniés, J. Boschmonart-Rives and X. Gabarrell, "Introducing eco-ideation and creativity techniques to increase and diversify the applications of eco-materials: The case of cork in the building sector",



- Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 606–616, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.121> ↑238
- [12] J. K. Prusty, S. K. Patro and S. S. Basarkar, “Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 5, no. 2, pp. 312–333, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2016.06.003> ↑238
- [13] B. S. Thomas and R. Chandra, “Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 113, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019> ↑238
- [14] N. D. Gil-Jasso et al., “Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils”, *Fuel*, vol. 239, pp. 611–616, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.055> ↑238
- [15] J. A. Rossignolo, M. V. Agnesini and J. A. Morais, “Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian light-weight aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 1, pp. 77–82, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00046-4) ↑239
- [16] Y. Ke, S. Ortola, A. L. Beaucour and H. Dumontet, “Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ)”, *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 11, pp. 1590–1600, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.07.001> ↑239
- [17] J. Yoon, J. Kim, Y. Hwang and D. Shin, “Lightweight Concrete Produced Using a Two-Stage Casting Process”, *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 4, pp. 1384–1397, 2015. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.3390%2Fma8041384> ↑239
- [18] A. Ardakani and M. Yazdani, “The relation between particle density and static elastic moduli of lightweight expanded clay aggregates”, *Applied Clay Science*, vol. 93–94, pp. 28–34, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.02.017> ↑239, 246
- [19] Q. Du, Q. Sun, J. Lv and J. Yang, “Use of Preplaced Casting Method in Lightweight Aggregate Concrete”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7234761> ↑239
- [20] M. Barbuta, R. D. Bucur, S. M. Cimpeanu, G. Paraschiv and D. Bucur, *Wastes in Building Materials Industry*. IntechOpen, 2015. <https://doi.org/10.5772/59933> ↑239
- [21] M. Barbuta et al., “Combined Effect of Fly Ash and Fibers on Properties of Cement Concrete”, in *10th International Conference INTERENG 2016*, Rumania, 2016. ↑239, 245
- [22] J. Bolden, T. Abu-Lebdeh and E. Fini, “Utilization of recycled and waste materials in various construction applications”, *American Journal of Environmental Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 14–24, 2013. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2013.14.24> ↑239
- [23] V. Gregorova, M. Ledererova and Z. Stefunkova, “Investigation of Influence of Recycled Plastics from Cable, Ethylene Vinyl Acetate and Polystyrene Waste on Lightweight Concrete Properties”, *Procedia Engineering*, vol. 195, pp. 127–133, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.534> ↑240
- [24] Instituto Nacional de Vías [INVÍAS], “Resistencia a la compresión de cilindros de concreto, I.N.V. E – 410 – 07”, INVÍAS, 2012. ↑240
- [25] Instituto Nacional de Vías [INVÍAS], “Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso, I.N.V. E – 227 – 13”, INVÍAS, 2013. ↑240
- [26] Instituto Nacional de Vías [INVÍAS], “Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval, I.N.V. E – 238 – 07”, INVÍAS, 2012. ↑245
- [27] R. Chang and W. Colledge, *Chemistry*. Ciudad de México: McGraw Hill, 2002. ↑245
- [28] R. Demirboga and A. Kan, “Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes”, *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 730–734, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.105> ↑245
- [29] Y. Liu et al., “Dynamic response of expanded polystyrene concrete during low speed impact”, *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 72–80, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.059> ↑245, 246
- [30] A. Kan and R. Demirboga, “A novel material for lightweight concrete production”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 7, pp. 489–495, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.002> ↑245
- [31] C. A. Cadere et al., “Engineering properties of concrete with polystyrene granules”, *Procedia Manufacturing*, vol. 22, pp. 288–293, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.044> ↑245
- [32] K. Ganesh Babu and D. Saradhi, “Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggrega-

- tes”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 6, pp. 605–611, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00034-9) ↑246
- [33] V. Ferrándiz-Mas and E. García-Alcoel, “Durability of expanded polystyrene mortars”, *Construction and Building Materials*, vol. 46, pp. 175–182, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.029> ↑246
- [34] B. Chen and J. Liu, “Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads”, *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 1, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.001> ↑246

---

### **María Paula Espinoza-Merchán**

Environmental Engineer from the University of Boyacá. Centralised in the area of treatment and disposal of solid waste, focused on the area of Materials Engineering.  
e-mail: mpespinosa@uniboyaca.edu.co

---

### **Laura Juliana Torres-Parra**

Environmental and sanitary Engineer from the University of Boyacá in Tunja- Boyacá, Colombia, maintaining a focus on the area of materials for engineering and solid waste management.  
e-mail: ljtorres@uniboyaca.edu.co

---

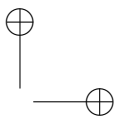
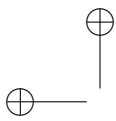
### **Pablo Miguel Coha-Vesga**

Chemical Engineer from the Industrial University of Santander -UIS and Master’s Degree in Chemical Engineering from the University of Campinas, Brazil. He is currently pursuing a doctorate in Engineering and Materials Science at the Pedagogical and Technological University of Colombia, working in the area of special steels produced by Induction Melting. He has worked in the area of materials, mainly in the area of synthesis of materials for catalysis processes.  
e-mail: pablo.coha@uptc.edu.co

---

### **Nicolas Rojas-Arias**

Metallurgical Engineer from the Pedagogical and Technological University of Colombia- UPTC. He has focused on the areas of materials and minerals processing, management of radioactive materials and waste, as well as the design of materials for engineering. He is currently doing his doctorate in Materials Science at the Materials Department -DeMa at the Federal University of São Carlos, Brazil, working in the area of Additive Manufacturing.  
e-mail: nicolas.rojas@uptc.edu.co



## Research

**Analysis of Power and Torque Performance of a Diesel Engine Operating with Palm Biodiesel Blends***Análisis del desempeño de la potencia y el torque de un motor diésel operando con mezclas de biodiésel de palma***Daniel Andrey Herrera Susa<sup>1</sup>, José Ricardo Bermúdez Samtaella<sup>2</sup>, Carlos Eduardo Castilla Álvarez<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta-Colombia), <sup>2</sup>Centro de Tecnología de Movilidad (CTM-UFGM), <sup>3</sup>Universidad Federal de Lavras, Brasil.  
correspondence e-mail: danielandreyhs@ufps.edu.co

Recibido: 06/12/2019. Modificado: 06/07/2020. Aceptado: 11/08/2020.

**Abstract**

**Context:** There is a trend in modern society that is based especially on the development of new bio-fuels, specifically oriented towards the field of internal combustion engines, establishing the loss of their thermal performance as a central point. This is one of the main challenges, where research is dynamized in a complex and important way. In this context, this research strengthens this area of knowledge and determines the performance behavior of a single-cylinder engine ignited by compression with mixtures between conventional diesel and biodiesel produced with innovative techniques.

**Method:** In this work, an analysis was made in a test bench for Diesel internal combustion engines, where the efficiency of the engine was characterized and determined, using Diesel and different mixtures such as B2, B5, B10, B20, B50 and B100, whose number determines the percentage of biodiesel in the mixture. The employed biodiesel was based on African palm oil and was obtained by means of microwave radiation technology. These tests were performed using the SAE J1349 standard. Data collection of factors such as power, torque, fuel consumption, and temperature, indicated engine performance, which in turn determined the effects of the different fuels under study.

**Results:** During the development of the tests and their analysis, it was evidenced that, for all the analyzed mixtures, combustion took place without complications. Additionally, when the percentage of biofuel in the mixture, fuel consumption reported increases greater or equal to 20 %, as well as power losses in the range of 40 %. Therefore, the use of microwave technology was shown to be more efficient for production.

**Conclusions:** With the applied methodology, it was determined that, for the B20 mixture, power values were the most stable in terms of thermal efficiency. In the context of the comparison of standard fuels, Colombian and Venezuelan diesel, under the same operating conditions, it was seen that the Venezuelan diesel-type fuel has better performance characteristics in terms of power, torque, and thermal stability. With respect to the specific consumption of the obtained fuel, the increase is observed with a higher percentage of biodiesel mixture, this being directly proportional to power loss.

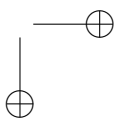
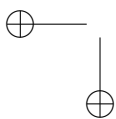
**Keywords:** Biofuel, blends, engine CI, performance, power, torque.

**Language:** Spanish

## Open access



Cite this paper as: D. Herrera, J. Bermúdez y C. Castilla: "Análisis del desempeño de la potencia y el torque de un motor diésel operando con mezclas de biodiésel de palma", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 250-263 (2020).  
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.15676>



### Resumen

**Contexto:** Hay una tendencia en la sociedad moderna que se basa especialmente en el desarrollo de nuevos biocombustibles, direccionada específicamente hacia el campo de los motores de combustión interna, estableciéndose como punto central la pérdida de su rendimiento térmico. Este es uno de los principales retos, donde la investigación se dinamiza en forma compleja e importante. En este contexto, esta investigación fortalece este área del conocimiento y determina el comportamiento del desempeño de un motor monocilíndrico encendido por compresión con mezclas entre el diésel convencional y un biodiésel producido con técnicas innovadoras.

**Método:** En este trabajo se realizó un análisis en un banco de pruebas para motores de combustión interna tipo Diésel, donde se caracterizó y se determinó la eficiencia del motor utilizando diésel y diferentes mezclas como la B2, B5, B10, B20, B50 y B100, el número determina el porcentaje de biodiésel en la mezcla. El biodiésel utilizado contó como base el aceite de palma africana y se obtuvo por medio de la tecnología de radiación por microondas. Estas pruebas fueron realizadas utilizando la norma SAE J1349. La toma de datos como potencia, torque, consumo de combustibles y temperatura indicaron el desempeño del motor, lo que a su vez determinó los efectos de los diferentes combustibles en estudio.

**Resultados:** Al desarrollar las pruebas y realizar su análisis se evidenció que para todas las mezclas analizadas, la combustión ocurrió sin complicaciones; además de esto, al incrementar el porcentaje de biocombustible en la mezcla, el consumo de combustible reportó aumentos mayores o iguales al 20 % del consumo de combustible, así como pérdidas de potencia en el rango del 40 %. Por lo tanto, el uso tecnología con microondas se mostró más eficiente para su producción.

**Conclusiones:** Con la metodología aplicada, se determinó que, para la mezcla B20, los valores de la potencia fueron los más estables en términos de rendimiento térmico. En el contexto del comparativo de los combustibles patrón, diésel colombiano y venezolano, sometidos bajo las mismas condiciones de operación, se obtuvo que el combustible tipo diésel venezolano presenta mejores características de rendimiento en cuanto a su potencia, torque y estabilidad térmica. Con respecto al consumo específico del combustible obtenido, se observa el aumento con mayor porcentaje de mezcla de biodiésel, esto directamente proporcional a la pérdida de potencia.

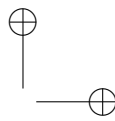
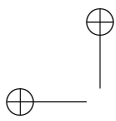
**Palabras clave:** Biocombustible, desempeño, mezclas, motor CI, potencia, torque.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

Hoy en día, la cultura hacia el desarrollo sustentable se basa en cómo reducir los niveles de emisiones en los subproductos de los combustibles de origen fósil. La principal opción es utilizar fuentes de energía renovables. En este contexto, el biodiésel se muestra como una de las opciones menos dañinas para el medio ambiente de los motores diésel, abriendo el camino a nivel mundial para la construcción de vehículos más ecológicos. Entre las ventajas del biodiésel predominan origen renovable, biodegradabilidad, reducción de emisiones. Además, mejora las características lubricantes y tiene un punto de inflamación por encima al del diésel [1]. Para este combustible más verde, se ha exigido su uso en muchos países en un rango de mezcla de hasta el 20 % con diésel, ello con el fin de contrarrestar la contaminación [2].

El biodiésel es un combustible líquido, no contaminante ni tóxico y biodegradable, este se produce principalmente a partir de diferentes tipos de aceites vegetales y de grasa animales [3]. Es necesario contar con catalizadores para que ocurra la reacción que produce el biodiésel. Estos ca-



talizadores pueden ser ácidos, básicos o enzimáticos, siendo los catalizadores básicos los que se utilizan a nivel industrial en la transesterificación. El NaOH y KOH son los más usados [4].

El biodiésel es considerado como un combustible renovable, trae beneficios para el medio ambiente y puede ser usado en los motores convencionales. Otra de las ventajas del biodiésel es que es biodegradable y emite menos gases de invernadero a la atmósfera, lo cual reducirá la producción de tanto CO<sub>2</sub> y disminuye su impacto en la capa de ozono; sin embargo, existe una degradación de la tierra donde son cultivadas las plantas destinadas al biocombustible [5]. El biodiésel no posee azufre y aromáticos. Tiene un alto número de cetano, contenido medio de oxígeno y mayor punto de ignición; reduce las emisiones de material particulado, no es tóxico, aunque puede causar altas emisiones de óxido de nitrógeno [6], [7]. Es obtenido a partir de fuentes renovables [8].

Los motores diésel, al trabajar con biodiésel, experimentan una pérdida de potencia debido, principalmente, al menor poder calorífico, aunque esto se ve compensado con el hecho de ser un recurso renovable y amigo del medio ambiente. Las principales variaciones que ocurren son en los parámetros técnicos y medio ambientales del motor de combustión interna [9], [10].

En este trabajo se muestra el comportamiento de un biocombustible fabricado con materias primas de la región del Catatumbo, Norte de Santander, Colombia, mezclado con diésel comercial y probado en un banco de pruebas de motores de combustión interna, monitoreando las variables características como torque, potencia y consumo específico de combustible. Con lo anterior, se determinó el desempeño del motor. Este tipo de investigación aporta más información para diversificar más la malla energética de la región y el país, incentivando a futuras investigaciones en el campo de estos dispositivos cuando funcionan con biocombustibles, los cuales, a futuro, son la principal fuente de cambio para aportar a contrarrestar el calentamiento global.

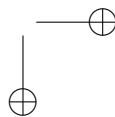
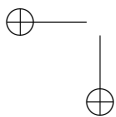
## 2. Materiales y métodos

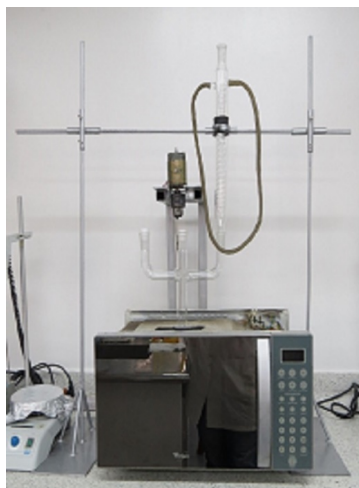
Este trabajo se realizó en dos fases, la primera fase se enfoca en la estandarización del proceso de producción del biodiésel a base de aceite de palma africana por medio de la radiación por microondas; además de esto, se realizaron las respectivas caracterizaciones antes y después de la reacción de transesterificación para verificar que se cumplan las respectivas normas del estándar del biodiésel.

La segunda fase es el estudio del desempeño mecánico del motor de encendido por compresión, instalado en el banco de pruebas, dentro de los laboratorios del grupo de investigación GIDPI. En este se analizaron las respectivas mezclas del diésel comercial con el biodiésel de palma. Las mezclas a estudiar fueron las referenciadas a continuación: B2, B5, B10, B20, B50 y B100.

### 2.1. Fabricación de biodiésel

La radiación con microondas se ha utilizado para una variedad de aplicaciones, incluyendo la reacción de síntesis orgánicas. Las reacciones químicas se aceleran debido a la absorción selectiva de energía de microondas por moléculas polares. Debido a que la mezcla de aceite vegetal, metanol





**Figura 1.** Prototipo de hidrodestilación de biodiésel por radiación desarrollado.

e hidróxido de potasio contiene ambos componentes polares e iónicos, el calentamiento es rápido [11].

Gracias a los conocimientos en el campo de la hidrodestilación asistida por hornos microondas por parte de los investigadores de los grupos de investigación vinculados, se diseñó y fabricó el prototipo para la producción de biodiésel. Las características de este prototipo constan de un control de potencia de un horno microondas convencional, un reactor para las reacciones de transesterificación, el sistema de agitación y un sistema de refrigeración, el cual es de vital importancia para la obtención de un máximo rendimiento. Uno de los principales retos fue el control de las variables dentro del proceso, como la temperatura, presión, velocidad de agitación y suministro de potencia eléctrica al horno; para ello fue necesario realizar sus respectivos diseños y simulaciones estructurales, térmicas y de vibraciones, con el propósito de obtener un correcto balanceo del sistema en general. En la Figura 1 se aprecia el prototipo de hidrodestilación asistida por radiación.

La descripción de todo el proceso y los resultados de esta metodología de producción de biodiésel se presentarán en un trabajo que está en desarrollo denominado “Análisis de los parámetros físico-químicos de Biodiesel de Palma (*Elaeis guineensis*) obtenido de la hidrodestilación asistida por microondas”. Es importante resaltar que el biocombustible se caracterizó bajo las normas nacionales (ICONTEC) e internacionales (ASTM 6751, EN 14214, DIN). Los principales resultados de la caracterización están presentes en la sección de resultados.

## 2.2. Banco de pruebas

El desarrollo del banco de prueba de diagnóstico para motores de combustión interna ha sido fundamental en la investigación en esta área, ello debido a que los motores son sometidos a mediciones de pruebas de durabilidad y carga que se repiten hasta alcanzar su óptimo desempeño y los resultados previstos por el fabricante [12]. Las caracterizaciones se realizaron en un banco de prue-

bas de motores de combustión interna tipo monocilíndrico diésel, que cuenta con un dinamómetro electrónico en el cual se realizaron los respectivos análisis de eficiencia energética.

A continuación, se presentan las características del motor que se utilizó para realizar las respectivas evaluaciones y análisis en pruebas estandarizadas, cumpliendo con las normas estipuladas para ensayos de combustión interna, ello se ve en la Tabla I.

**Tabla I.** Especificaciones técnicas del motor.

<b>Especificación</b>	<b>Magnitud</b>
Referencia	HAZT 1B30-2
Número de Cilindros	1
Ciclo	Cuatro tiempos diésel
Refrigeración	Por aire
Suministro Combustible	Inyección directa
Rpm máx.	3600
Carrera	80X69mm
Cilindrada	347 cm <sup>3</sup>
Peso	35 Kg
Potencia	5,4 kW/ 7,3 Hp
Relación de compresión	22:1

En la tabla II se muestran las características de la instrumentación utilizada. Este equipo fue meticulosamente calibrado bajo las normas establecidas para dichas pruebas. También, en la Figura 2, se aprecia el conjunto del banco utilizado en este trabajo, resaltando que es un banco con los estándares exigidos por la norma SAE-J1349.

**Tabla II.** Instrumentación del banco de pruebas.

<b>Variable a Medir</b>	<b>Sensor</b>	<b>Marca</b>	<b>Rango</b>	<b>Precisión</b>
Caudal de combustible	Bureta graduada	PYREX	0-150 mL	5 mL
Caudal de aire	Manómetro de presión diferencial	GUNT	0-569 L/min	0,01 L/min
Fuerza	Célula de carga planas ZLB	FLINET	20-200 kg	—
Temperatura	Termocuplas tipo K	GUNT	0- 1000 °C	1 °C
Revoluciones	Sensor de proximidad P1C2S0802NOPA3	Wachendorff	0-9999 min -1	150 rpm



Figura 2. Banco de pruebas usado para el análisis de este trabajo.

## 2.3. Metodología de las pruebas

### 2.3.1. Motor a ciclo diésel

Las investigaciones en el campo de este tipo de motores aportan al desarrollo de la malla vehicular a nivel mundial, debido a que son los más usados en la industria de carga y su respectivo análisis complementan el desarrollo de estos dispositivos. Para el análisis del desempeño del motor con diferentes combustibles se contó con un motor monocilíndrico a ciclo diésel de 5,4 kW, de encendido manual, de refrigeración por aire y aspiración natural, tal como se observa en la Tabla I. Este motor, cuenta con un sistema de control de las condiciones ambientales del lugar de trabajo, evitando errores de las medidas de la instrumentación y pérdidas de la eficiencia del motor.

### 2.3.2. Software y adquisición de datos

El *software* de adquisición de datos utilizado en esta investigación presenta, en tiempo real, todas las magnitudes medidas de los principales parámetros de operación del motor, entre ellos: consumo específico de combustible, caudal de aire de entrada, rendimiento mecánico, rendimiento energético, rendimiento volumétrico, rango del valor de lambda, potencia térmica y mecánica, revoluciones, presión del ambiente. Este *software* se diseñó para obtener hasta cuatro curvas características simultáneamente, con el objetivo de hacer el monitoreo al comportamiento del motor. El ambiente de su programación se desarrolló a través de la herramienta computacional LabView®.

### 2.3.3. Selección de la prueba, a carga constante y carga variable

Para esta fase se hizo necesario elegir qué tipo de prueba es la más recomendada, debido a que para el análisis de los motores encendido por chispa o por compresión, la norma SAE J1349 estipula el código de pruebas de potencia de motores. Por lo anterior, se determinó usar la metodología de pruebas a carga variable y aceleración constante. En esta metodología se utilizó como punto de referencia el motor a máxima aceleración, a una velocidad de rotación de 3500 rpm, abriendo la válvula de combustible al 100 % para, posteriormente, aplicar gradualmente la carga con el



dinamómetro, que disminuye en porcentaje del 25 %. En este recorrido se tomó, a través de la adquisición de datos, el cúmulo de información necesaria para el respectivo análisis. Cabe señalar que se debe obtener el punto de equilibrio y, así, obtener las condiciones en régimen estable del sistema, encontrando la reducción del error de sus medidas en referencia. Para disminuir el error en las diferentes pruebas se tomó como estándar lo determinado en los autores [6], [7], donde se establece que en un régimen apropiado se deben hacer de cinco a diez repeticiones. Otro elemento para tomar este intervalo es lo recomendado en normas como la SAE J1349. En esta investigación se aplicaron ocho repeticiones por muestra.

Estas pruebas experimentales se realizaron en primer lugar con el diésel comercial en Colombia, después se mezcló con el biodiésel producido. Las proporciones de mezcla usadas fueron: B2, B5, B10, B20, B50 y B100. Cabe mencionar que el número presentado determina el porcentaje de biodiésel. Además, en segundo lugar, se tuvo como patrón el diésel suministrado en la República Bolivariana de Venezuela.

### 3. Resultados

En la Tabla III se presentan los resultados de la caracterización del biodiesel, donde se obtienen los rangos y los valores calculados de los diversos parámetros comprometidos en este estudio a través de las respectivas normas que lo soportan. Así, como se indicó en la sección 2.1., para este trabajo de investigación se desarrolló un biocombustible que cumplió con los estándares presentes en las normas nacionales e internacionales en cuanto a fabricación y uso.

**Tabla III.** Caracterización fisicoquímica del biodiesel de palma fabricado para esta investigación.

Parámetro	Unidades	Norma	Rango	Valor Calculado
Densidad	g/ml	NTC 336	0,86 – 0,90	0,85
Peso específico	g/cm <sup>3</sup>			0,75
Viscosidad	mm <sup>2</sup> /s a 40 °C	ASTM D445 (metodología de prueba estándar para la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos)	1,9 - 6	5,11
Poder calorífico	Kcal/kg		—	41085,29
Número de cetano	cetanos	D 613	47 mínimo	58
Índice de saponificación	—	ASTMD 94	195-205	193,75
Índice de acidez	Acidez: % en masa de acuerdo con el tipo de muestra	NTC 218	—	74,95
Índice de Yodo	Acidez: % en masa de acuerdo con el tipo de muestra	NTC 238	120 máximo	50,02
Índice de refracción	—	NTC 289, ASTMD 1218	—	1,4405

Continuando, se presentan los resultados obtenidos en la Tablas IV-Tabla XI, donde se representan los comportamientos de los combustibles patrones y de las respectivas mezclas estipuladas con biodiésel. La información adquirida fue seleccionada bajo los criterios más relevantes para este estudio con respecto al freno, porcentaje de carga y velocidad de giro, torque, temperatura de los gases de salida del motor T1, la temperatura del combustible a la entrada del motor T2, la temperatura del medio donde se realizan las pruebas T3, el consumo de combustible y la potencia generada. Estos resultados fueron a condiciones de aceleración constante y aplicando carga en intervalos de 25 % hasta un valor de 100 %.

**Tabla IV.** Resultados del comportamiento del motor con el diésel colombiano.

N°	Freno		Torque	Temperatura			Gasto		Potencia	Eficiencia
	% carga	Rpm	T(Nm)	T1	T2	T3	Consumo (kg/h)	Consumo específico (g/kwh)	(kw)	%
1	0	3000	13,35	471,15	25	31	1,137	295,03	4,22	28,377
2	25 %	2700	14,4	488,61	25	31	0,765	179,53	4,06	46,634
3	50 %	2300	14,2	481,20	25	31	0,760	187,22	3,56	44,719
4	75 %	1900	14,83	455,27	25	31	0,553	160,08	3,01	52,298
5	100 %	1500	12,89	402,41	25	31	0,646	260,83	2,01	32,097

**Tabla V.** Resultados del comportamiento del motor con el diésel venezolano.

N°	Freno		Torque	Temperatura			Gasto		Potencia	Eficiencia
	% carga	Rpm	T(Nm)	T1	T2	T3	Consumo (kg/h)	Consumo específico (g/kwh)	(kw)	%
1	0	3000	13,52	439,26	25	31	1,008	356,77	4,21	30,486
2	25 %	2700	14,68	469,71	25	31	1,142	274,62	4,27	32,357
3	50 %	2300	15,13	464,37	25	31	0,676	174,25	3,61	48,045
4	75 %	1900	15,55	441,96	25	31	0,636	186,71	3,13	44,840
5	100 %	1500	13,53	396,26	25	31	0,537	195,92	2,18	43,849

**Tabla VI.** Resultados del comportamiento del motor con la mezcla B2.

N°	Freno		Torque	Temperatura			Gasto		Potencia	Eficiencia
	% carga	Rpm	T(Nm)	T1	T2	T3	Consumo (kg/h)	Consumo específico (g/kwh)	(kw)	%
1	0	3000	14,84	484,65	25	31	1,235	279,30	4,72	29,975
2	25 %	2700	15,56	501,30	25	31	0,982	215,01	4,42	38,938
3	50 %	2300	15,82	488,79	25	31	0,760	184,89	3,80	45,280
4	75 %	1900	15,95	467,76	25	31	0,713	193,94	3,23	43,169
5	100 %	1500	13,65	388,16	25	31	0,629	268,40	2,22	31,192

Análisis del desempeño de la potencia y el torque de un motor diésel operando con mezclas de biodiésel de palma

**Tabla VII.** Resultados del comportamiento del motor con la mezcla B5.

N°	Freno		Torque	Temperatura			Gasto		Potencia	Eficiencia
	% carga	Rpm	T(Nm)	T1	T2	T3	Consumo (kg/h)	Consumo específico (g/kwh)	(kw)	%
1	0	3000	15,45	493,06	25	31	1,297	293,78	4,86	28,498
2	25 %	2700	15,35	507,94	25	31	1,049	223,56	4,44	37,450
3	50 %	2300	15,85	501,29	25	31	0,739	161,77	3,89	51,751
4	75 %	1900	14,92	431,23	25	31	0,625	180,68	2,75	46,335
5	100 %	1500	12,07	370,52	25	31	0,599	261,94	1,99	31,962

**Tabla VIII.** Resultados del comportamiento del motor con la mezcla B10.

N°	Freno		Torque	Temperatura			Gasto		Potencia	Eficiencia
	% carga	Rpm	T(Nm)	T1	T2	T3	Consumo (kg/h)	Consumo específico (g/kwh)	(kw)	%
1	0	3000	14,77	511,15	25	31	0,873	191,53	4,62	43,210
2	25 %	2700	14,81	503,61	25	31	0,734	169,59	4,19	48,799
3	50 %	2300	14,39	476,61	25	31	0,858	225,45	3,50	36,708
4	75 %	1900	13,36	426,45	25	31	0,744	237,25	2,53	34,882
5	100 %	1500	11,56	362,23	25	31	0,584	238,84	1,89	29,865

**Tabla IX.** Resultados del comportamiento del motor con la mezcla B20.

N°	Freno		Torque	Temperatura			Gasto		Potencia	Eficiencia
	% carga	Rpm	T(Nm)	T1	T2	T3	Consumo (kg/h)	Consumo específico (g/kwh)	(kw)	%
1	0	3000	14,21	497,65	25	31	1,406	304,34	4,44	27,509
2	25 %	2700	14,61	497,46	25	31	1,173	272,41	4,21	30,733
3	50 %	2300	14,38	475,61	25	31	0,568	148,17	3,43	56,502
4	75 %	1900	13,53	432,73	25	31	0,506	187,86	2,68	30,191
5	100 %	1500	11,06	365,37	25	31	0,362	163,15	1,80	51,314

#### 4. Análisis de resultados

En la Tabla XII se presenta un análisis estadístico de comparación de media, donde se observan las diferencias significativas entre los resultados calculados de las diferentes repeticiones. Para la variable de potencia, tiende a ser mayor cuando el porcentaje de mezcla de biodiesel es más pequeño, tal como lo indica [14], esto debido al bajo poder calorífico del biocombustible en comparación con el de origen fósil. Con el torque, los resultados son similares a los de la potencia, a mayor

**Tabla X.** Resultados del comportamiento del motor con la mezcla B50.

N°	Freno		Torque		Temperatura			Gasto		Potencia	Eficiencia
	% carga	Rpm	T(Nm)	T1	T2	T3	Consumo (kg/h)	Consumo específico (g/kwh)	(kw)	%	
1	0	3000	12,64	437,07	25	31	1,339	375,57	3,88	22,292	
2	25 %	2700	13,46	429,85	25	31	1,240	322,92	3,83	25,926	
3	50 %	2300	13,33	407,56	25	31	0,663	184,27	3,23	45,433	
4	75 %	1900	12,95	382,85	25	31	0,816	266,59	2,61	31,403	
5	100 %	1500	11,23	344,72	25	31	0,444	200,09	1,80	41,842	

**Tabla XI.** Resultados del comportamiento del motor con la mezcla B100.

N°	Freno		Torque		Temperatura			Gasto		Potencia	Eficiencia
	% carga	Rpm	T(Nm)	T1	T2	T3	Consumo (kg/h)	Consumo específico (g/kwh)	(kw)	%	
1	0	3000	6,01	268,63	25	31	1,075	265,86	1,60	5,933	
2	25 %	2700	6,10	274,63	25	31	1,075	516,09	1,59	5,933	
3	50 %	2300	8,09	284,82	25	31	0,842	516,09	1,98	16,22	
4	75 %	1900	8,70	274,03	25	31	0,842	1411,19	1,90	16,22	
5	100 %	1500	7,26	268,63	25	31	0,367	1411,19	1,15	31,49	

mezcla de biodiésel, mayor será la pérdida del mismo. La mejor relación de mezcla que indicó esta comparativa fue la B20, debido a que se busca un punto donde el porcentaje de biocombustible sea mayor, pero sin ver afectadas las variables que abarcan la tendencia del rendimiento en el motor de combustión interna, con las variables de consumo y consumo específico, donde existe un cambio significativo después de la mezcla B20, en este punto el aumento del gasto es mayor. Esto se debe a las propiedades del mismo biocombustible, tal como lo indica [14] y, en términos energéticos, deja de ser viable un combustible con un consumo alto. Por lo anterior, es de gran interés e importancia este tipo de investigaciones, las cuales se enfocan en encontrar puntos medios entre las mezclas de biocombustible y los orígenes fósiles. A continuación, la Tabla XII presenta el análisis estadístico de comparación media en referencia a sus respectivas muestras, dando como variables representativas la potencia, el torque y su análisis de gasto descrito en su consumo y consumo específico.

El comportamiento de la potencia en función de la rotación puede ser apreciado en la Figura 3, para los combustibles patrón, diésel colombiano, diésel venezolano y mezclas con biodiésel.

Al hacer un análisis comparativo de las diferentes curvas presentes en la Figura 3, en la que se relaciona la potencia en función de la rotación del motor para las diferentes mezclas, se observa que las mezclas que obtuvieron el mejor comportamiento en lo equivalente al mayor aporte de la potencia son la B2 y B5. Estos valores son corroborados según la investigación [13]; en este estudio referenciado, se presenta una metodología que se basa en encontrar la mejor proporción biodiésel-diésel y, de ahí, se selecciona como mezcla la B20 por ser la mezcla que menos pérdida de potencia

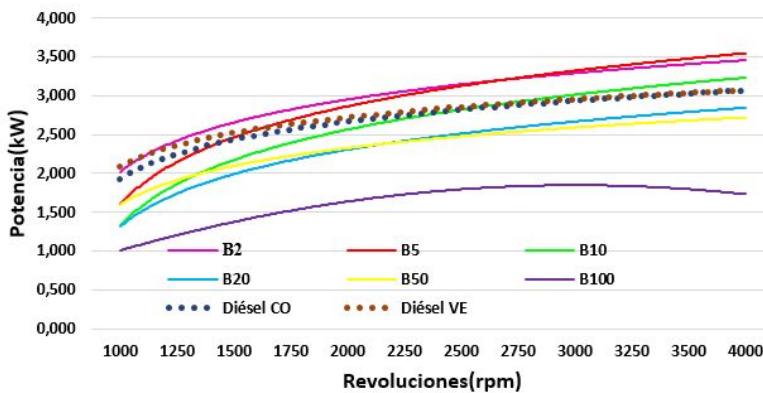
**Tabla XII.** Análisis estadístico de comparación de Media.

Muestra	Potencia (kw)	Torque (Nm)	Gasto	
			Consumo (kg/h)	Consumo específico (g/kwh)
B2	3,804	15,816	0,756	185,05
B5	3,852	15,722	0,729	162,12
B10	3,504	14,252	0,857	225,51
B20	3,442	14,382	0,574	248,51
B50	3,150	13,194	0,645	284,31
B100	1,892	7,954	0,853	517,92
Diésel CO	3,544	14,266	0,755	187,02
Diésel VE	3,692	15,190	0,675	175,11

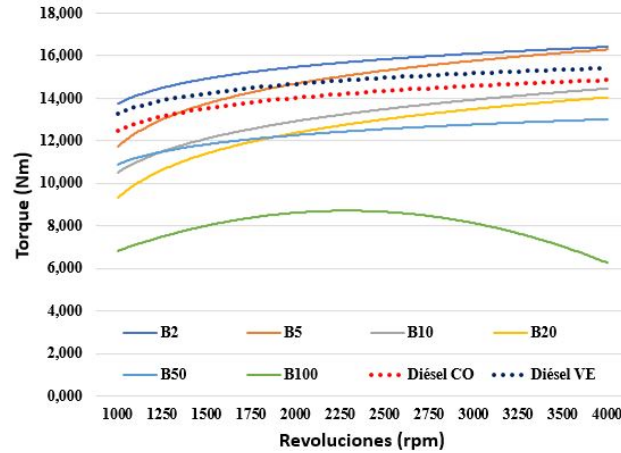
presentó con respecto a su proporción en comparación con las mezclas B50 y B100, que a diferentes velocidades y porcentajes de carga se presentan mayores pérdidas. Esto es un indicador muy importante para el estudio de las proporciones ideales y de la búsqueda del punto medio de mezcla, para un máximo aprovechamiento del combustible y mejores prestaciones en su eficiencia.

En la Figura 4, se presenta la tendencia de la potencia respecto a las revoluciones del motor a prueba, operando con las diferentes mezclas en estudio.

En el análisis comparativo de la Figura 4, para las curvas del torque se mantiene la tendencia que se observó en la potencia de las mezclas B2 y B5 que tienen mayor alcance. Se determina que a mayor mezcla de biodiésel, mayor será la pérdida de torque, tal como lo indica [14], con este resultado la curva de mayor estabilidad con respecto a la relación diésel-biodiésel fue la mezcla B20. Las mezclas con el torque más bajo fueron las B50 y B100. En el análisis comparativo de



**Figura 3.** Curvas de potencia con respecto a la velocidad de mezclas con biodiésel, combustibles patrón diésel colombiano y venezolano.



**Figura 4.** Curvas de torque con respecto a la velocidad de mezclas con biodiésel, combustibles patrón diésel colombiano y venezolano.

los combustibles patrón se observa un ligero aumento del diésel venezolano con respecto al colombiano. Siempre es mejor para la reducción de las emisiones un porcentaje alto de biodiésel en la mezcla [10], pero en términos de rendimiento se verán afectadas las variables del motor, como torque y potencia, causando un aumento de consumo específico de combustible [9], [13], [14]. De ahí, nace la importancia de realizar este tipo de investigaciones que presenten resultados óptimos con la utilización de una mayor mezcla de biodiésel en los combustibles distribuidos por el territorio nacional en los motores de combustión interna.

## 5. Conclusiones

Con la metodología aplicada para las pruebas, se determinó que para la mezcla B20 los valores de la potencia fueron los más estables en términos de rendimiento térmico, ello en razón de que a menor porcentaje de mezclas se obtuvo mayor potencia, pero entre más grande sea el porcentaje de mezcla con biodiésel, más aportará a la reducción de la contaminación.

En el contexto del comparativo de los combustibles patrones, el diésel colombiano y el diésel venezolano sometidos bajo las mismas condiciones de operación, se encontró que el combustible tipo diésel venezolano presenta mejores características de rendimiento en cuanto a su potencia, torque y estabilidad térmica. Siendo validado por el número de repeticiones y condiciones de pruebas estipulado dentro de la norma SAE J1349.

Con respecto al consumo específico del combustible obtenido, se observa el aumento con mayor porcentaje de mezcla de biodiésel, esto directamente proporcional a la pérdida de potencia. Para el uso prolongado del biocombustible se recomienda un porcentaje intermedio que aporte al medio ambiente, pero sin disminuir el rendimiento, esto se presenta debido a las características de bajo poder calorífico que posee el biodiésel en comparación con el combustible de origen mineral.

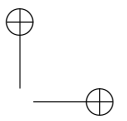
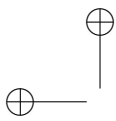
## Referencias

- [1] A. Pérez, M. A. Coronado, G. Montero, C. García, R. Ayala y H. E. Campbell, “Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diéselbiodiésel”, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 16, n.º 1, pp. 83-92, 2015. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)72109-8](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)72109-8) ↑251
- [2] I. S. Abd *et al.*, “A review for key challenges of the development of biodiesel industry”, *Energy Conversion and Management*, vol. 185, pp. 508-517, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.019> ↑251
- [3] L. Hernández, M. Benitez y B. Aguilera, “Obtención y caracterización del biodiésel”, *Ciencia en su PC*, vol. 1, n.º 1, pp. 1-11, 2019. ↑251
- [4] L. E. Medina, N. A. Chávez y J. Jáuregui, “Biodiésel. Un combustible renovable”, *Investigación y Ciencia*, vol. 20, n.º 55, pp. 62-70, 2012. ↑252
- [5] S. D. Parra, “Impacto de los biocombustibles y desarrollo de las energías alternativas en Colombia”, *Revista Gestión y Desarrollo Libre*, n.º 2, pp. 23-32, 2016. ↑252
- [6] A. Rojas, O. Chaparro y C. Ospina, “Evaluación de mezclas biodiésel-diésel en la generación de energía eléctrica”, *Ingeniería y Universidad*, vol. 15, n.º 2, pp. 319-336, 2011. ↑252, 256
- [7] R. L. Barbosa, F. Moreira, N. Salvador y C. E. Silva, “Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiésel”, *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 32, n.º 5, pp. 1588-1593, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542008000500035> ↑252, 256
- [8] M. Conceicao *et al.*, “Thermoanalytical characterization of Castor oil Biodiésel”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, n.º 5, pp. 964-975, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.001> ↑252
- [9] R. Piloto, N. Ferrer y N. Ferrer, “Evaluación del desempeño de un motor Yuchai trabajando con biodiésel cubano”, *Ingeniería Energética*, vol. 31, n.º 3, pp. 70-79, 2010. ↑252, 261
- [10] L. Mónico, J. Sandoval, A. Rodríguez, “Estudio teórico sobre la influencia del uso de mezclas de biodiesel de aceite de palma con jet A-1 en Motores a reacción”, *Ingeniería*, vol. 22, n.º 1, pp. 140-151, 2017. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2017.1.a06> ↑252, 261
- [11] L. Jar-Jin y C. Yu-Wen, “Production of biodiesel by transesterification of Jatropha oil with microwave heating”, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 75, pp. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.03.034> ↑253
- [12] F. Márquez y M. S. Rojas, “Diseño y construcción de un banco de pruebas para motores monocilíndrico de cuatro tiempos a gasolina”, tesis de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2011. [https://repository.upb.edu/bitstream/handle/20.500.11912/1679/digital\\_21165.pdf?sequence=1](https://repository.upb.edu/bitstream/handle/20.500.11912/1679/digital_21165.pdf?sequence=1) ↑253
- [13] A. García, “Evaluación del desempeño y emisiones de un motor de trabajo pesado encendido por compresión cuando es operado con biodiésel y aceite de Jatropha y Diésel Fósil”, tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2015. <http://bdigital.unal.edu.co/51615/1/alexandergarciamariaca.2015.pdf> ↑259, 261
- [14] G. G. Reyes, J. A. Castillo y A. X. Escalante, “Determinación de torque y potencia de un motor de combustión interna utilizando Mezclas parciales de Biodiésel”, *Ingeniería solidaria*, vol. 12, n.º 20, pp. 23-31, 2016. <https://doi.org/10.16925/in.v19i20.1413> ↑258, 259, 260, 261

### Daniel Andrey Herrera Susa

Recibió el título de Ingeniero Mecánico en 2019 de la Universidad Francisco de Paula Santander, con mención de honor por su trabajo de grado *laureado* y del cual se desarrolló este artículo. Se desempeñó en el grupo de investigación en Desarrollo de Procesos Industriales GIDPI de la UFPS y en el grupo de investigación FITOBIOMOL también de la UFPS, actualmente investigador con el perfil académico multidisciplinario, proactivo y dispuesto a afrontar nuevos retos con gran dedicación. Cuyas áreas de interés son: mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, sistemas térmicos, motores de combustión Interna, biocombustibles, energías renovables, procesos de manufactura y refrigeración.

CvLAC: [https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0001674223](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001674223)



Correo electrónico: danielandreyhs@ufps.edu.co

---

### José Ricardo Bermúdez Santaella

Recibió el título de ingeniero Electricista en 1991 de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Recibió el título de magíster en Automatización, Control e Instrumentación en 2016 de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Es profesor de tiempo completo del Departamento de Electricidad y Electrónica en la Universidad Francisco de Paula Santander de Cúcuta, Colombia. Categorizado en la escala de Colciencias como Investigador Asociado. Es fundador y director del grupo de investigación de Desarrollo en Procesos Industriales (GIDPI-2004). Sus áreas de interés son: automatización, control e instrumentación, procesos de manufactura, motores de combustión interna y turbomaquinas. Cuenta con experiencia en el sector industrial.

CvLAC: [https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0000168742](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000168742)

Correo electrónico: josericardobs@ufps.edu.co

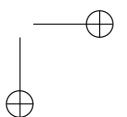
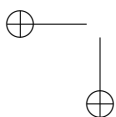
---

### Carlos Eduardo Castilla Álvarez

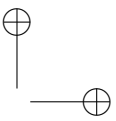
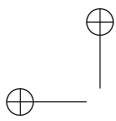
Graduado en Ingeniería Electromecánica en la Universidad Francisco De Paula Santander (2012), magíster en Ingeniería Mecánica en la Universidad Federal de Minas Gerais (2015), doctor en Ingeniería Mecánica en la Universidad Federal de Minas Gerais (2018). Actualmente es profesor adjunto en la Universidad Federal de Lavras (UFPA) y ejecuta proyectos de investigación en el Centro de Tecnología de Movilidad (CTM) de UFMG-BRASIL y en el Grupo de Investigación de Desarrollo en Procesos Industriales de UFPS-COLOMBIA. Con énfasis en motores de combustión interna, transferencia de calor, enfriamiento, instrumentación, modelado matemático, control y automatización de procesos industriales. Creativo, innovador, investigador líder, responsable, honesto, disciplinado y listo para enfrentar nuevos desafíos con la máxima dedicación y compromiso. Con habilidades de software de ingeniería para el diseño y desarrollo de ingeniería de detalle en procesos industriales (SolidEdge, AutoCAD, Matlab, Simulink y LabVIEW). En constante aprendizaje y disposición para mantener el crecimiento personal y profesional.

CvLAC: [https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0001476018](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001476018)

Correo electrónico: carlos.alvarez@ufla.br







Research

## Knowledge Base Model for Security Audits in Web Services with SQL Injection

*Modelo base de conocimiento para auditorías de seguridad en servicios web con inyección SQL*

**John Edison Moreno Marín<sup>\*</sup>1, Paulo Cesar Coronado Sánchez<sup>\*\*</sup>1** 

<sup>1</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá-Colombia)

<sup>\*</sup>Correspondence e-mail: jemorenom@correo.udistrital.edu.co

<sup>\*\*</sup>paulo.cesar@udistrital.edu.co

Recibido: 23/12/2020. Modificado: 30/06/2020. Aceptado: 14/07/2020.

### Abstract

**Context:** Due to the large number of cyber-attacks at international and national levels (Colombia), preventive mechanisms and procedures have been triggered by organizations in order to counteract vulnerabilities in information security. The issue studied by this project arises from the need to make a proposal to the DIAN information security office to implement and follow up on the MinTIC Online Government Strategy in the Information Security and Privacy component, through the institutional information security policy and through this knowledge base model for audits in web services, applied to a particular prototype.

**Method:** The general methodology for the knowledge base model the first corresponds to the collection, processing, and purification of the base, and the second corresponds to the systematization process of the proposed model. OpenKM (an open software) was implemented to support the knowledge base. For the development of the audit, it is important to keep in mind that, within the general methodology, a series of guides were included in each of the phases of the model. The project uses standards, good practices, tools, and professional advice such as ISO27000, OSSTMM, OWASP, JUnit, and the Risk Management and Audit guides issued by MinTIC. For the development of the prototype with the presented WS, the OPENUP method was used. The implementation was limited to the construction of two HTTP methods: GET and POST for consultation and information entry actions.

**Results:** With this project, it was possible to create a knowledge base model implemented on OpenKM, executing a web services security audit with SQL Injection on an organizational prototype.

**Conclusions:** It must be taken into account that there will never be a 100 % secure infrastructure, since there will always be risks on the platforms due to the changing nature of the attacks. However, there will always be alternatives such as this base model of information security auditing to avoid or mitigate such risks or attacks.

**Keywords:** Information model, information security, computer security, web services, web application auditing, SQL Injection, knowledge base, ontologies, taxonomies.

**Language:** Spanish

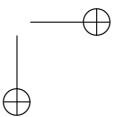
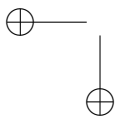
### Open access



Cite this paper as: J. Moreno y P. Coronado: "Modelo base de conocimiento para auditorías de seguridad en servicios web con inyección SQL", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 264-283 (2020).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.15740>



### Resumen

**Contexto:** Debido a la gran cantidad de ciberataques a nivel internacional y nacional (Colombia), se han activado mecanismos y procedimientos preventivos en las organizaciones para contrarrestar estas vulnerabilidades en la seguridad de la información. El tema de este proyecto surge de la necesidad de hacer una propuesta a la oficina de seguridad de la información de la DIAN para implementar y dar seguimiento a la estrategia de Gobierno en línea de MinTIC en el componente de seguridad de la información y privacidad, ello a través de la política de seguridad de la información institucional y de este conocimiento aplicado al modelo base para auditorías en servicios web, aplicado a un prototipo particular.

**Método:** La metodología general para el modelo base de conocimiento incluye dos partes del trabajo. La primera corresponde a la recolección, procesamiento y purificación de la base. La segunda corresponde al proceso de tematización del sistema del modelo propuesto. OpenKM (un *software* abierto) se implementó para sustentar la base de conocimiento. Para el desarrollo de la auditoría es importante tener en cuenta que dentro de la metodología general se incluyeron una serie de guías en cada una de las fases del modelo. El proyecto utiliza estándares, buenas prácticas, herramientas y asesoramiento profesional como ISO27000, OSSTMM, OWASP, JUnit y las guías de gestión de riesgos y auditoría emitidas por el MinTIC. Para el desarrollo del prototipo con el WS a exponer, se utilizó el método OPENUP. La implementación se limitó a la construcción de dos métodos HTTP, GET y POST para consultas y acciones de entrada de información.

**Resultados:** Con este proyecto fue posible crear un modelo de base de conocimiento implementado en OpenKM, ejecutando una auditoría de seguridad de servicios web con inyección de SQL en un prototipo organizacional.

**Conclusiones:** Se debe tener en cuenta que nunca habrá una infraestructura 100 % segura, ya que siempre habrá riesgos en las plataformas debido a la naturaleza cambiante de los ataques. Sin embargo, siempre habrá alternativas como esta, un modelo base de auditoría de seguridad de la información para evitar o mitigar tales riesgos o ataques.

**Palabras clave:** Auditoría de aplicaciones web, base de conocimiento, inyección SQL, modelo de información, ontologías, seguridad de la información, seguridad informática, servicios web, taxonomías.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

Desde el momento en que una aplicación web de tipo organizacional es desplegada en un ambiente de producción bajo una determinada infraestructura es susceptible de recibir ataques malintencionados. Prevenir que esos ataques resulten exitosos es uno de los principales intereses del área de seguridad de cualquier entidad gubernamental o privada.

El proyecto se enfoca en dos áreas complementarias: (a) modelos de base de conocimiento del dominio de seguridad de aplicaciones web [1] y (b) auditorías de vulnerabilidad a vectores de ataque SQL Injection en servicios web [2]. Lo anterior abordado desde los fundamentos, estándares, métodos y conceptos técnicos [3].

Este proyecto en modalidad de profundización busca crear un modelo base de conocimiento para guiar procesos de auditoría de seguridad web en un prototipo organizacional, frente a los riesgos informáticos a los que esté expuesto. En concordancia con los recientes ataques cibernéticos a las

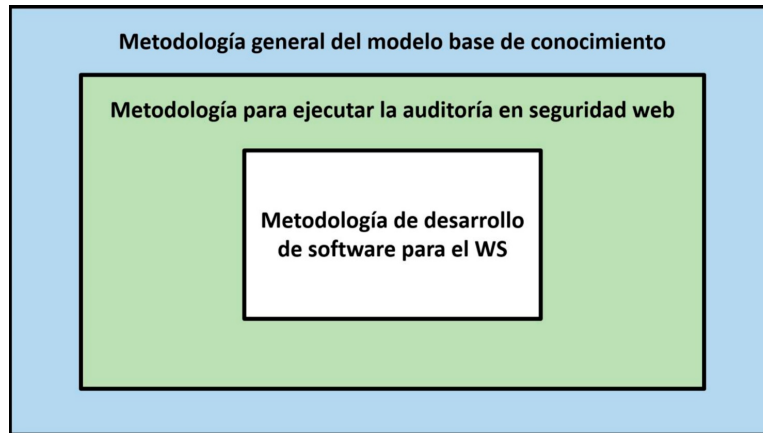


Figura 1. Ejemplificación de metodologías utilizadas en el proyecto.

plataformas de las grandes multinacionales, se ofrecen alternativas de solución con el fin de contribuir en el campo de investigación de la seguridad de la información [4].

A su vez, se busca a futuro evaluar el estado de seguridad en los servicios web expuestos en los aplicativos en producción de una entidad. Enmarcado en un modelo de información específico, y mediante herramientas y técnicas del modelo, se permitirá la visualización y definición de un estado de seguridad de su información digital y de los datos expuestos de dicha organización [5].

Este proyecto bajo la modalidad de profundización ejecuta una prueba del modelo en el marco del área de seguridad de la información, específicamente la seguridad informática, para mitigar ataques de tipo SQL Injection (SQLi) como vector de ataque de este proyecto [5]. La taxonomía del modelo se desarrolló con ideas propias y extrayendo ideas de varias investigaciones previas, las cuales se irán referenciando a medida que se adelanta el documento [6].

## 2. Metodología

Para la elaboración de este modelo, se utilizaron varias metodologías integradas una dentro de otra, las cuales se ejemplifican en un diagrama (Figura 1).

### 2.1. Metodología general del modelo base de conocimiento

Esta sección constituye la definición metodológica general para el desarrollo del modelo en sus diferentes elementos; por lo tanto, se contextualizan varias investigaciones, artículos, trabajos y definiciones de los componentes esenciales al momento de realizar un análisis a los modelos de base de conocimiento. Este proyecto incluye dos tipos de metodologías de trabajo. La primera corresponde al diseño del prototipo del sistema recolección, procesamiento y depuración de la base de conocimiento para preparar el modelo prototipo. La segunda corresponde al proceso de sistematización del modelo de diagnóstico. Ambas metodologías tienen como soporte la investigación y,

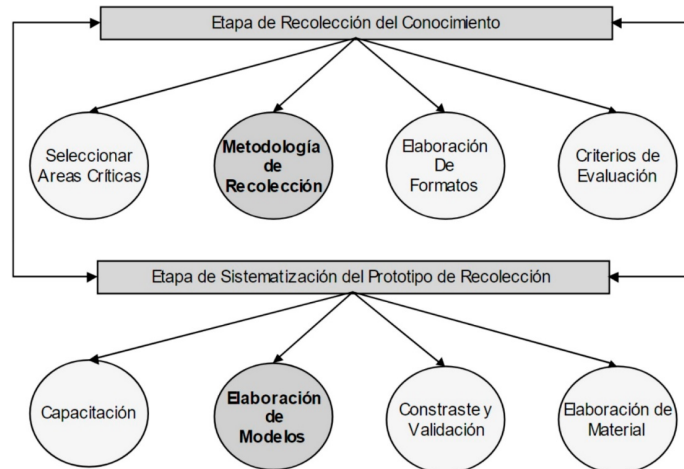


Figura 2. Metodología de desarrollo para la Base de Conocimiento Fuente: [7].

aunque se dan de manera simultánea, para efectos de presentación se analizan por separado (Figura 2).

Una base de conocimiento tiene como objetivo principal modelar y almacenar bajo forma digital un conjunto de conocimiento, ideas, conceptos o datos que permitan ser consultados o utilizados en la base de conocimientos. Existen varios métodos y programas para crear bases de conocimientos [8].

## 2.2. Metodología para ejecutar la auditoría en seguridad web

Para la preparación de la auditoría se presentará la metodología, los tiempos y recursos que se utilizarán. Se recolecta y analiza la información evidenciando los hallazgos, las oportunidades de mejora y las fortalezas encontradas durante la auditoría. Una vez se culmine, se presentarán las conclusiones. Con base en el informe de la auditoría, se establecerán las acciones de mejora pertinentes [9].

La metodología inicia con un proceso de planeación. En esta se fijan los objetivos y las herramientas a usar, esto implica qué hacer, cómo hacerlo y cuándo hacerlo. Esta etapa incluye una investigación previa con el fin de conocer la operación de lo que se va a evaluar [9].

Para el desarrollo de la auditoría es importante tener presente que dentro de la metodología general se incluyeron una serie de guías en cada una de las fases del modelo. El proyecto hará uso de estándares, buenas prácticas, herramientas y consejos profesionales tales como: NTC-ISO-IEC 27000, 27001, 27002, 27005, 31000, OSSTMM, OWASP, JUnit y las guías de gestión de riesgos y auditoría emitidas por el MinTIC. Todo esto aplicado al vector de ataque SQL Injection [10], [11].

En la Figura 3, extraída del reporte de seguridad de IBM con la herramienta X-Force IRIS (por sus

siglas en inglés de *Incident Response and Intelligence Services*), entre 2011 y 2019 se muestra cómo los ataques de inyección de SQL han afectado diferentes tipos de organizaciones o industrias de diferentes países en 2011. También se determina que en el 2012 hubo la mayor cantidad de ataques de este tipo, 79 en total. A partir de ahí fue disminuyendo; sin embargo, no han desaparecido totalmente, incluso en enero de este año ocurrió un ataque en Dinamarca [12].

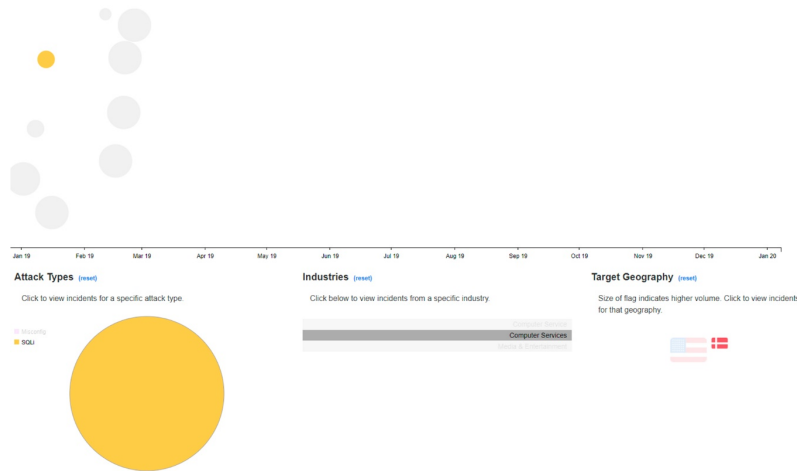


Figura 3. Evolución de ataques de inyección SQL durante 2019 Fuente: [13].

### 2.3. Metodología de desarrollo de *software*

Para crear la metodología de desarrollo de este proyecto se usó el método OpenUP. Este se define como un proceso unificado ligero que aplica enfoques iterativos e incrementales dentro de un ciclo de vida estructurado. OpenUP adopta una filosofía pragmática y ágil que se centra en la naturaleza colaborativa del desarrollo de *software*. Es un proceso agnóstico de herramientas y de baja ceremonia que se puede extender para abordar una amplia variedad de tipos de proyectos.

Para las pruebas a la aplicación desarrollada se utilizó JUnit, un marco de código abierto diseñado con el propósito de escribir y ejecutar pruebas en el lenguaje de programación Java. JUnit, originalmente escrito por Erich Gamma y Kent Beck, ha sido importante en la evolución del desarrollo basado en pruebas, lo cual forma parte de un paradigma de diseño de *software* más amplio conocido como *extreme programming* (XP).

### 2.4. Modelo de arquitectura del modelo base de conocimiento

La arquitectura de la solución se desarrollará bajo la arquitectura cliente-servidor del lado de la base de conocimiento y de componentes independientes del lado de la auditoría del web service.

Arquitectura base de conocimiento en OpenKM (cliente-servidor):

Servidor	Apache Tomcat: https://ritaportal.udistrital.edu.co:10229
Cliente	Cualquier cliente web.
Cliente	Glassfish: https://ipservidor.:8080/FacturaElectronica/test-resbeans.html
Servidor	Cualquier cliente dentro del segmento de red privado.

Arquitectura del modelo base de conocimiento para auditoría de web service (Figura 4).

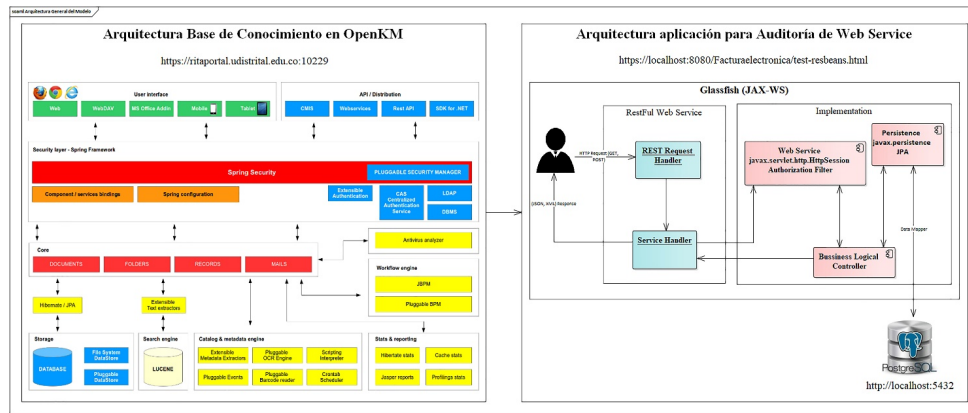


Figura 4. Arquitectura del modelo general Fuente: [14].

El objetivo consiste en aplicar la revisión de SQL Injection a un dominio de información (Factura Electrónica Web) para evitar ataques en servicios web mediante una auditoría de seguridad (Figuras 5, Figura 6 y Figura 7).

**Ingreso al Sistema - Factura Electrónica**

**Login**

Nombre de Usuario \*

Clave \*

**Ingresar como:**

Proveedor

Facturador

Adquiriente

**Ingresar**

Figura 5. Inicio de sesión general en el prototipo.

Considerando los requisitos funcionales, se establecen los comportamientos deseados del aplicativo Factura Electrónica Web, los cuales fueron traducidos en especificaciones técnicas utilizando el lenguaje de descripción de aplicaciones web (WADL) utilizado por la herramienta Netbeans, que permitió desarrollar la construcción del servicio web RESTful. Este permite escoger el método (GET, utilizado únicamente para consultar información al servidor, o POST, utilizado para solicitar

la creación de un nuevo registro) y el formato (XML, un lenguaje de marcado extensible, o JSON, un formato ligero de intercambio de datos) para la consulta o ingreso de datos de la aplicación (Figura 8).

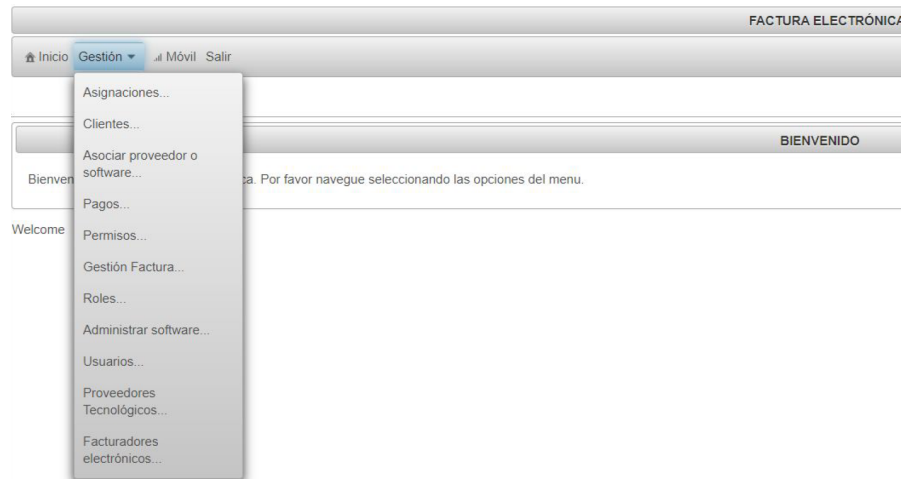


Figura 6. Menú general con los módulos de gestión del prototipo.

LIST GESTIÓN FACTURA

Id Gestion Factura	Identificación Cliente	Nombres Cliente	Nombre Software	Tipo	Origen	Numero Documento	Observaciones	Fecha Recibido	Fecha Entrega	Estado	Valor
1	1032987127	YESBIBY ESPERANZA LEE OLAYA	CONTABILIDAD	FACTURA	NACIONAL	9845	NA	12/12/2018	12/15/2018	EN PROCESO	30000
2	1032987127	YESBIBY ESPERANZA LEE OLAYA	INVENTARIO	BORRADOR	EXTRANJERA	3653	NA	12/12/2018	12/15/2018	EN PROCESO	10000
5	1032987127	YESBIBY ESPERANZA LEE OLAYA	TALENTO HUMANO	FACTURA	EXTRANJERA	3654	PRUEBA	01/22/2019	01/25/2019	RECIBIDO	500000

Figura 7. Ingreso a módulo de gestión de facturas electrónicas vía web.



Figura 8. Interfaz gráfica del web service RESTful.

Se virtualizó Kali Linux para ejecutar la propuesta de auditoría sobre el Web Service de la aplicación Factura Electrónica Web (Figura 9).

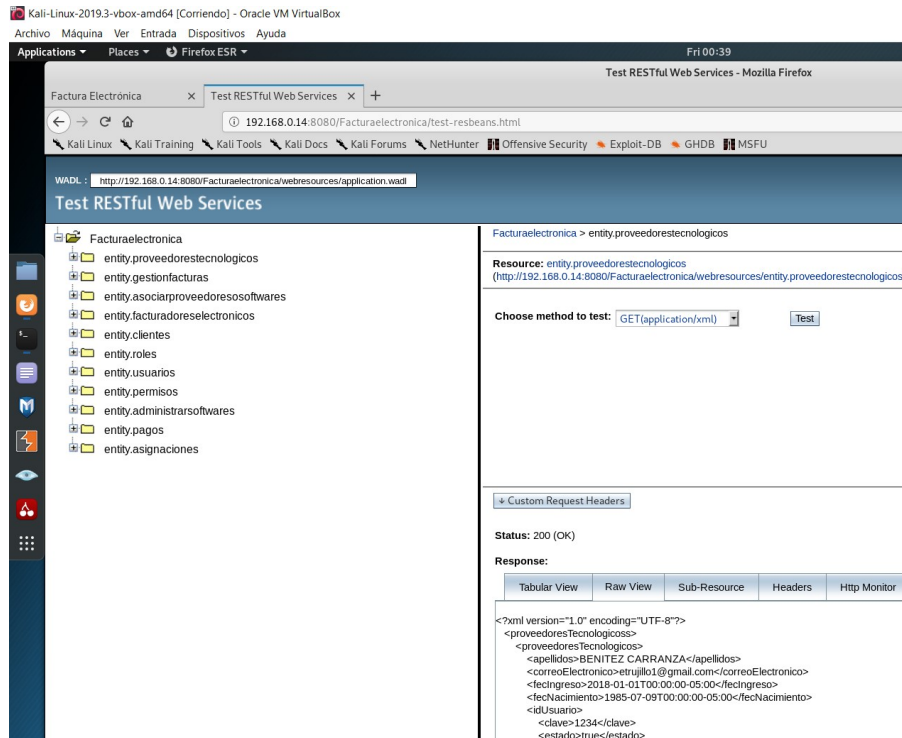


Figura 9. Acceso desde Kali al servicio web registrado para pruebas de auditoría con SQLi.

Se realizaron pruebas unitarias con la herramienta JUnit a la clase encargada de gestionar la seguridad para el aplicativo y el web service (Figura 10).

### 3. Resultados

- Implementación del estilo arquitectónico en el prototipo.

Para implementar el prototipo se utilizó el estilo arquitectónico por capas ejemplificado en un modelo vista-controlador (MVC). Estos sistemas constituyen uno de los estilos que aparecen con mayor frecuencia mencionados como categorías mayores del catálogo, o, por el contrario, como una de las posibles encarnaciones de algún estilo más envolvente. En [15] definen el estilo en capas como una organización jerárquica, tal que cada capa proporciona servicios a la capa inmediatamente superior y se sirve de las prestaciones que le brinda la inmediatamente inferior. Instrumentan así una vieja idea de organización estratigráfica que se remonta a las concepciones formuladas por el patriarca Edsger Dijkstra en la década de 1960, largamente explotada en los años subsiguientes.



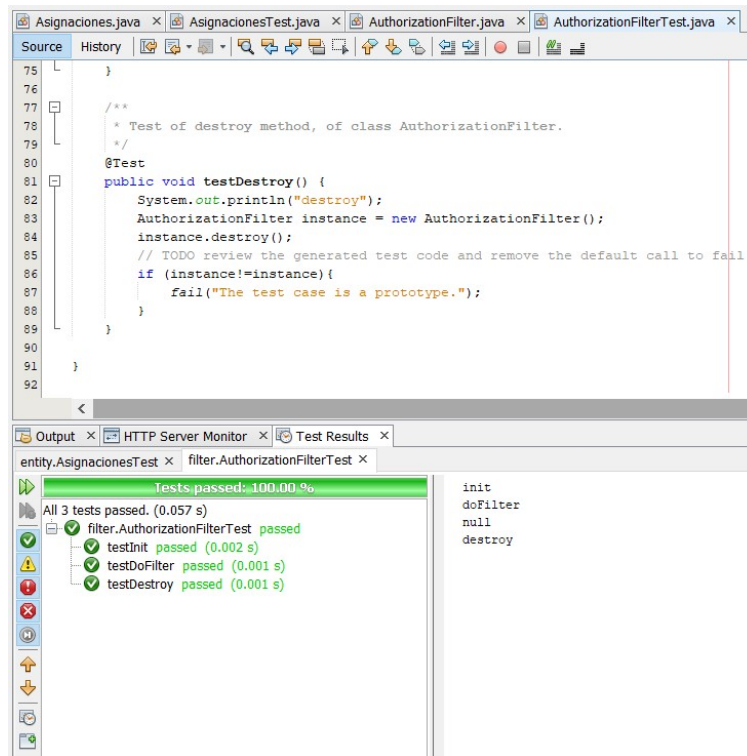


Figura 10. Pruebas con JUnit para Clase AuthorizationFilter.

Se definió el modelo de datos e identificadores que representan los recursos a exponer. La construcción del WS se limitó a la implementación de la tecnología de servicio web RESTful (*Representational State Transfer, based on Rest architecture*), con dos métodos HTTP, GET y POST, para especificar las acciones de consulta y registro de información respectivamente. Cabe aclarar que se estableció así, de acuerdo con el masivo uso que se tiene en las entidades y organizaciones del estado colombiano (probablemente por su potencial escalable, así como el acceso con escaso consumo de recursos). Sin embargo, si se prefiere implementar SOAP por su robustez, la seguridad, el control y la validación que ofrecen los esquemas debido a su alto acoplamiento, se podría usar en integraciones de cores bancarios o pasarelas de pago. Para las fases de inicio, elaboración, construcción y transición de la aplicación y del servicio web de la aplicación objeto de auditoría se implementó el método OpenUP en cuatro iteraciones, una por cada fase.

**Fase inicial:** En primera instancia, se realizaron reuniones de trabajo entre el director del proyecto y el estudiante, en las que se explicó la visión de la aplicación, la metodología y el entorno en que se desenvolverá el proyecto. Finalmente se seleccionó la tecnología y técnica a utilizar en el desarrollo del prototipo de aplicativo del proyecto.

- Caracterización previa de la aplicación objeto de auditoría.

**Fase elaboración:** Tomando en cuenta los requisitos funcionales y no funcionales se implementó la aplicación, la cual soporta la solución de Factura Electrónica Web y se crea el inicio de sesión general de dicho aplicativo con un tipo de usuario.

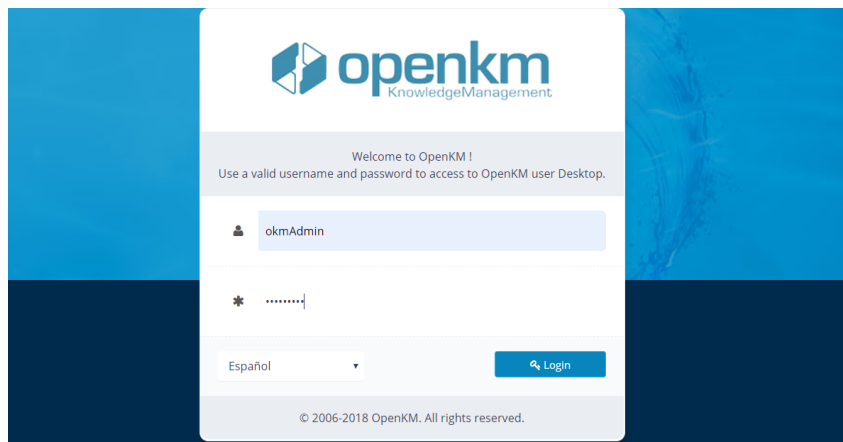
- Iteración 2. Implementación del aplicativo Factura Electrónica Web como prototipo.

**Fase implementación:** Considerando los requisitos funcionales, se establecen los comportamientos deseados del aplicativo Factura Electrónica Web, los cuales fueron traducidos en especificaciones técnicas a través del lenguaje de descripción de aplicaciones web (WADL) utilizado por la herramienta Netbeans. Este permitió desarrollar la construcción del servicio web RESTful, el cual permitió escoger el método (GET o POST) y el formato (XML) para la consulta o ingreso de datos de la aplicación.

- Iteración 3. Implementación del web service a través del IDE Netbeans.

**Fase transición:** Finalmente, para realizar el despliegue en el ambiente de desarrollo y la integración a del aplicativo con el web *service*, se usó un módulo de seguridad de la solución, el cual consiste en la implementación de una librería llamada AuthorizationFilter, debido al impacto que tiene en el modelo de negocio del proyecto.

- Iteración 4. Integración del aplicativo y el WS a través del módulo de seguridad.
- Se definió el modelo y se implementó en el portal de RITA UD (Red de Investigaciones de Tecnología Avanzada de la Universidad Distrital) la herramienta en la cual se soporta la base de conocimiento, ello de acuerdo con las investigaciones descritas anteriormente y seleccionando la más idónea para el proyecto. Esta solución es OpenKM en su versión libre (Figura 11).



**Figura 11.** Ventana de inicio de sesión de la herramienta OpenKM que soporta el modelo.

- Se realizó una auditoría de seguridad en servicios web de una entidad o un prototipo organizacional enfatizando en el tema de SQL Injection.

Como resultado final, se ejemplifica el modelo con cada uno de los segmentos de la jerarquía de base de conocimiento (la cual se expondrá a continuación para futuras confrontaciones) para la auditoría en servicios web con el fin evitar los ataques de tipo SQL Injection como vector de ataque del proyecto. Esta servirá para que el usuario tenga una orientación de la taxonomía manejada en este modelo. La taxonomía del modelo se desarrolló extrayendo ideas propias y de varias investigaciones previas, las cuales se irán referenciando a medida que va avanzando el documento. A continuación, se presenta cada uno de los segmentos [6] y [2].

- Con el documento maestro resultado del punto anterior, se alimentó la base de conocimiento orientado a la seguridad informática.

En cada subsección se mostrará al lado un ítem de obligatoriedad u opcionalidad de acuerdo con el modelo que se está proponiendo, por ejemplo: Escaneo de puertos y versiones (obligatorio), análisis SSL (opcional). En caso tal de que el usuario no desee desarrollar los ítems propuestos en el modelo, este modelo no se hará responsable de los resultados finales en cuestión de la base de conocimiento y de la auditoría de los servicios web. Las secciones principales son obligatorias en este modelo, ya que se manejan en las auditorías de servicios de aplicaciones web [16] (Figura 12).

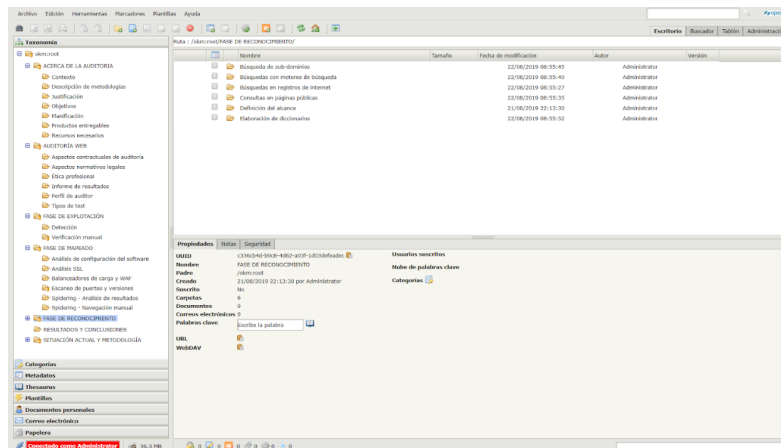


Figura 12. Pantalla inicial de la herramienta OpenKM del modelo propuesto.

La herramienta permite visualizar los archivos en .pdf almacenados en la base, con formato .doc para documentos, .xls para hojas de cálculo y .ppt para presentaciones (Figura 13).

### 3.1. Jerarquía del modelo base de conocimiento para auditorías de servicios web

#### Acerca de la auditoría

En esta sección introductoria de vital importancia se realiza un primer acercamiento al negocio de la auditoría de aplicaciones web, ya que se deben conocer los inicios del proyecto que abordará el

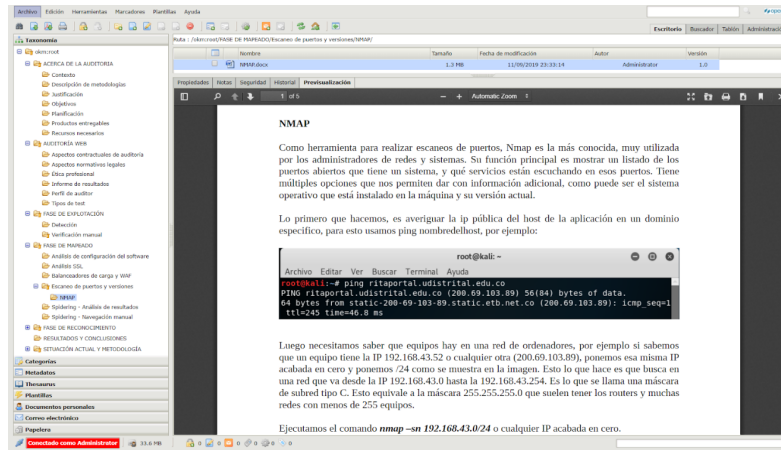


Figura 13. Visualización de archivos del modelo propuesto en la herramienta OpenKM.

usuario. Esta sección se desarrollará de acuerdo con el modelo del negocio definido por el usuario. Se hace con el fin de orientar al usuario y ubicarlo en una primera instancia del modelo.

### Contexto (obligatorio)

En esta subsección se realiza una descripción y contextualización del negocio al cual el usuario requiere hacer la auditoría. La subsección se desarrollará con los modelos y diagramas que se obtengan del negocio definido por el usuario, tales como el modelo de arquitectura, diagrama de componentes o diagrama de clases. Esta subsección se hace con el fin de que el usuario halle disponibles sus modelos y diagramas iniciales del negocio objeto de auditoría en la base de conocimiento.

### Justificación (obligatorio)

En esta subsección se redactan los motivos de la importancia de realizar la auditoría en un modelo de negocio predefinido por el usuario. Se desarrollará con las necesidades propias del negocio por el cual se quiere hacer la auditoría. Tiene el fin de que el usuario halle siempre disponibles las necesidades y motivos del negocio objeto de auditoría en la base de conocimiento.

### Objetivos (obligatorio)

En esta subsección se redactan los objetivos generales y específicos a alcanzar por el usuario en la auditoría. Se desarrollará con los objetivos del usuario en el contexto propio del modelo de negocio. Tiene el fin de que el usuario halle siempre disponible los objetivos generales y específicos del negocio objeto de auditoría en la base de conocimiento.

### Productos entregables (obligatorio)

En esta subsección se describen los productos a entregar previstos por el usuario una vez realizada la auditoría. Se desarrollará con los productos previstos propios del modelo de negocio que el usuario tiene que entregar. Tiene el fin de que el usuario halle siempre disponible la lista de productos a entregar de acuerdo con la auditoría realizada.

### **Recursos necesarios (obligatorio)**

En esta subsección se describen los recursos mínimos preliminares y necesarios que debe tener el proyecto y el modelo de negocio. Se desarrollará con investigaciones previas que se han realizado a nivel de infraestructura (*hardware* y *software*) y de las herramientas necesarias en el proyecto. Tiene el fin de que el usuario halle siempre disponible el listado de recursos mínimos necesarios para lograr los objetivos del proyecto en cuestión para realizar la auditoría

### **Descripción de metodologías (obligatorio)**

En esta subsección se describen las metodologías y buenas prácticas utilizadas de acuerdo con el proyecto y al modelo de negocio. Se desarrollará con investigaciones previas que se han realizado sobre las metodologías acordes al proyecto y definidas en el anteproyecto, con aplicación en contexto nacional e internacional. Tiene el fin de que el usuario halle siempre disponible las metodologías definidas para la elaboración del proyecto en cuestión y para realizar la auditoría.

### **Planificación (obligatorio)**

En esta subsección se propone como opcional debido a que, dependiendo de las metodologías implementadas por el proyecto y también la dimensión del modelo de negocio, el concepto de tiempo en la planificación entraría como temporal. Esta subsección se desarrollará con la herramienta Project de Microsoft con el proyecto en cuestión. Tiene el fin de que el usuario halle siempre disponible un cronograma planificado con las iteraciones, fases, actividades y tiempos del proyecto actual para realizar la auditoría.

### **Actual situación y metodología**

En esta sección de referencia del modelo se realiza un estado del arte de la seguridad de las aplicaciones web y de las metodologías utilizadas en la misma, ya que es necesario conocer el punto de partida del proyecto. Se desarrollará de acuerdo con el estado del arte de seguridad de las aplicaciones web, las metodologías y las buenas prácticas actuales en este campo. Tiene el fin de hacer que el usuario esté inmerso en este tema de seguridad de aplicaciones web y para ver cuáles metodologías y buenas prácticas puede aplicar de acuerdo con su modelo de negocio.

### **Osstmm (obligatorio)**

En esta subsección se expone brevemente, el manual de metodologías de la OSSTMM y los casos de pruebas catalogados por el manual en cuestión, ya que es un elemento importante que se requiere en la auditoría y que ayudará al usuario en la práctica. Se desarrollará con los tipos y casos de acuerdo con las últimas versiones propuestas por el OSSTMM. Tiene el fin de que el usuario halle disponibles los conceptos, tipos y casos de prueba de seguridad en el modelo propuesto.

### **Owasp (opcional)**

En esta subsección se exponen los tipos de ataques y las vulnerabilidades más populares actualmente, concernientes a la guía de seguridad de pruebas de OWASP, ya que es un referente mundial importante en el tema de la seguridad de aplicaciones y servicios web. Esta subsección se desarrollará de acuerdo con el último top diez propuesto por el OWASP. Esta subsección se hace con el fin de que el usuario halle disponibles los tipos de ataques y vulnerabilidades de seguridad de acuerdo con el modelo propuesto [16].

**MinTIC (opcional)**

En esta subsección se exponen los lineamientos, modelos de seguridad y guías metodológicas y de auditorías propuestas actualmente por MinTIC, ya que es el referente nacional en el tema de la seguridad de aplicaciones y servicios web. Se desarrollará de acuerdo con las últimas versiones de los documentos mencionados previamente. Tiene el fin de que el usuario halle disponibles los lineamientos, modelos de seguridad y guías metodológicas y de auditorías de seguridad de acuerdo con el modelo propuesto.

**Auditoría WEB**

En esta sección se explican los temas más destacados de auditoría web en un ambiente organizacional.

**Perfil de auditor (opcional)**

Perfil de auditor (opcional) Esta subsección describe el perfil del auditor informático, encargado de aplicar sus conocimientos para lograr unos resultados de calidad y generar así recomendaciones de valor para la auditoría. Se marca como opcional en tanto no es un ítem bloqueante para poder proceder con la auditoría. Esta subsección se desarrollará con la información que se tenga de perfiles de auditores en revisiones en auditorías de información. Tiene el fin de que el usuario halle disponibles las características del perfil de un auditor de seguridad informático de acuerdo con el modelo propuesto.

**Tipos de test (obligatorio)**

En esta subsección se exponen los tipos (interna o externa) y enfoques de la auditoría, ya que puede ser aplicada a diferentes contextos. Se desarrollará con la información de revisiones que se tenga de los diferentes enfoques. Tiene el fin de que el usuario halle disponibles los enfoques de auditoría de acuerdo con el modelo propuesto.

**Aspectos contractuales de auditoría (obligatorio)**

En esta subsección se exponen los aspectos contractuales de la auditoría, ya que son los que el auditor firma con la organización en caso de ser aplicada. Se desarrollará con la información de revisiones que se tenga de los tipos de permisos, acuerdos, reglas y del alcance al aplicar una auditoría. Tiene el fin de que el usuario halle disponibles los aspectos más comunes de una auditoría.

**Aspectos normativos legales (obligatorio)**

En esta subsección se exponen las normas y leyes que apliquen en la auditoría, ya que si la organización encuentra vulnerabilidades que afecten información personal (*habeas data*), esta debe blindarse según las leyes expuestas en este apartado. Esta subsección se desarrollará con la información de revisiones que se tenga de las leyes y normas que apliquen en la auditoría. Tiene el fin de que el usuario halle disponibles las leyes y normas, ya sean nacionales o internacionales, al realizar la auditoría.

**Ética profesional (obligatorio)**

En esta subsección se exponen algunos aspectos éticos del auditor de vital importancia, ya que la reputación y la confianza son temas que se gana el auditor en el desarrollo y resultados de su trabajo. Esta subsección se desarrollará con la información de revisiones que se tenga de asuntos

destacables en el tema de la ética profesional en la auditoría. Tiene el fin de que el usuario halle disponibles los acuerdos de confidencialidad y de imparcialidad que se tenga al aplicar la auditoría.

#### **Informe de resultados (obligatorio)**

En esta subsección se expone la estructura y la forma como se elabora el informe de resultados final, ya que este documento reúne todo el trabajo realizado en la auditoría. La subsección se desarrollará con la información de revisiones que se tenga de estructuras y elaboraciones de informes que se tenga en auditorías. Tiene el fin de que el usuario halle disponible una estructura general del informe de resultados de la auditoría.

#### **Fase de reconocimiento**

En esta sección se hace la recolección de toda la información que sea posible acerca del objetivo en el marco organizacional establecido o modelo de información definido; información como direcciones IP, nombres de máquinas, infraestructura de la red, perfiles y configuración de servidores, *software*, entre otros [6].

#### **Definición del alcance (obligatorio)**

En esta subsección se define con el cliente el alcance de la auditoría, ya que se debe saber con exactitud lo que se va a hacer, qué tanto se va a hacer y hasta dónde se va a hacer. Esta subsección se desarrollará con la información de los requerimientos funcionales y no funcionales del modelo de negocio. Se hace con el fin de que el usuario tenga disponible el alcance de la auditoría y pueda tomar decisiones concernientes al tipo de prueba que se aplicará (caja negra, blanca o gris).

#### **Búsquedas en registros de internet (obligatorio)**

En esta subsección se definen y se aplican herramientas para búsqueda específica en la web, ya que se deben identificar datos particulares de la infraestructura básica del modelo de negocio objetivo de testeo. La subsección se desarrollará con datos clave como el tipo de servidor de la máquina, bajo qué sistema operativo funciona, qué servicios tiene, qué puertos están abiertos, cuál es su configuración, con qué otras máquinas se conectan, entre otros. Se tiene el fin de que el usuario tenga los datos generados con las herramientas disponibles.

#### **Consultas en páginas públicas (opcional)**

Esta subsección muestra información asociada a la organización a la cual se le está realizando la auditoría; sin embargo, se marca opcional, ya que si bien pueden ser útiles los datos que se encuentran en la web pública, no es un ítem bloqueante para poder proceder con la auditoría. La subsección se desarrollará con páginas, grupos, listas y motores de búsqueda generales públicos en la web. Se tiene el fin de que el usuario halle disponibles las fuentes públicas de las cuales se extrajo información extra.

#### **Búsquedas con motores de búsqueda (opcional)**

Esta subsección muestra información relacionada con motores de búsqueda concretos; sin embargo, se marca opcional, ya que si bien pueden ser útiles los datos que se encuentren con el motor, no es un ítem bloqueante para poder proceder con la auditoría. La subsección se desarrollará con información del fichero “robots.txt” y datos de motores de búsqueda concretos. Se tiene el fin de que el usuario halle disponibles las fuentes concretas de las cuales se extrajo información extra.

**Búsqueda de subdominios (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con la forma de encontrar nuevas máquinas objetivo, ya que se puede comprobar si el dominio que se audita tiene subdominios asociados. La subsección se desarrollará con información que se extraiga de la herramienta Fierce de Kali Linux. Se tiene el fin de que el usuario halle disponibles los datos extraídos de la herramienta de penetración Fierce.

**Elaboración de diccionarios (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con la elaboración de diccionarios, ya que es otra técnica de *hacking* que puede servir en la auditoría. Esta subsección se desarrollará con información que se extraiga de la herramienta *CeWL* de Kali Linux. Se hace con el fin de que el usuario tenga disponibles los datos extraídos de la herramienta generadora de listas de palabras *CeWL*.

**Fase de mapeado**

En esta sección se hace la recolección de toda la información que sea posible acerca aplicación web objetivo, el servicio web expuesto y el servidor web que los aloja. Para ello, se emplearán distintas herramientas que generarán datos específicos como puertos, uso de protocolos y seguridad explícita de la aplicación [17].

**Escaneo de puertos y versiones (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con el escaneo de puertos, ya que en el tema de mapeado es una tarea inevitable para la auditoría. La subsección se desarrollará con información que se extraiga de la herramienta de escaneo de puertos TCP y UDP *Nmap*. Se tiene el fin de que el usuario tenga disponible la información de los puertos extraídos con herramienta.

**Análisis SSL (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con el análisis del protocolo seguro SSL, ya que este garantiza la confidencialidad de las comunicaciones vía web para la aplicación objeto de auditoría. Esta subsección se desarrollará con información que se extraiga de las herramientas *TLSSled* y *SSLDigger*, las cuales analizan la seguridad de las implementaciones en los protocolos SSL/TLS de un servidor objetivo. Se tiene el fin de que el usuario tenga disponible la información del análisis SSL realizado con dichas herramientas.

**Balancedores de carga y WAF (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con los balancedores de carga y con cortafuegos de aplicaciones web (WAF), ya que con estos datos se sabrá si la aplicación objeto de auditoría se encuentra alojada en varios servidores o solo en uno, también si está protegida detrás de un cortafuegos. La subsección se desarrollará con información que se extraiga de las herramientas *Wafw00f* y *Halberd*, las cuales analizan el balanceo de carga y protección de la aplicación web. Se tiene el fin de que el usuario halle disponible la información sobre balancedores de carga y *firewall* de aplicaciones web.

**Análisis de configuración del software (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con la configuración de la aplicación objeto de auditoría, ya que con estos datos se entenderá cómo está construido el sistema a nivel de software.



La subsección se desarrollará con información que se extraiga de la herramienta Nikto, la cual sirve para buscar estas vulnerabilidades en aplicaciones web. Se hace con el fin de que el usuario tenga disponible la información sobre dichas vulnerabilidades, si las hay.

#### **Spidering. Navegación manual (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con la navegación manual en profundidad de la aplicación (también llamado rastreo de la aplicación), ya que con estos datos es posible conocer a fondo el sitio web e identificar todas las funciones que implemente. La subsección se desarrollará con información que se extraiga de la herramienta ZAP, la cual sirve para identificar objetivos, recursos y parámetros que luego se escanearon con el *fuzzer* contenido en la herramienta. Se hace con el fin de que el usuario tenga disponible la información con base en los datos extraídos con ZAP.

#### **Spidering. Análisis de resultados (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con el análisis de los resultados una vez realizado el recorrido manual de todas las páginas, ya que el objetivo es encontrar archivos en el servidor web. La subsección se desarrollará con información que se extraiga con la función “Spider” de la herramienta ZAP. Se hace con el fin de que el usuario tenga disponible la información con base en los datos encontrados con la función “Spider” de ZAP.

#### **Fase de explotación**

En esta sección se desarrollarán dos tareas principales, las cuales son detección y verificación. Cada una de estas tareas estará compuesta por hallazgos concretos que se logren encontrar en esta auditoría. Cada una de las demás auditorías será distinta, sobre todo en esta fase, ya que los hallazgos serán distintos cada vez, así que las pruebas que habrá que realizar cambiarán. También cambiarán en función de otros factores como la aplicación a auditar, o las tecnologías que use el prototipo. Para este caso específicamente son JSF, JPA, EJB, Primefaces, Glassfish, entre otras [7].

#### **Detección (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con la búsqueda y detección de vulnerabilidades a partir de los resultados obtenidos durante la fase de mapeado, ya que se debe probar cómo se comporta la aplicación ante errores introducidos a propósito. La subsección se desarrollará con información que se arroje del ejercicio del comportamiento de la aplicación ante errores, luego se escanean los recursos o métodos que envían parámetros al servidor objetivo y, por último, se emplearán ataques de *fuzzing* (técnica de pruebas en *software*) sobre los parámetros encontrados en los puntos anteriores. Se hace con el fin de que el usuario tenga disponible la información obtenida de toda la tarea de detección.

#### **Verificación SQL Injection (obligatorio)**

Esta subsección muestra información relacionada con la verificación manual de los descubrimientos previos, ya que se debe analizar cada hallazgo sospechoso que aún no haya sido confirmado. La subsección se desarrollará con información específica del segmento de SQL Injection en el modelo propuesto con base en la revisión que se hizo en dicho apartado. Se hace con el fin de que el usuario tenga disponible la información obtenida de todo el ejercicio de verificación de vulnerabilidades usando el vector de ataque SQL Injection.

### Resultados y conclusiones

En esta sección se muestran los resultados finales de la auditoría y unas conclusiones del trabajo realizado. Además, se compara con los objetivos propuestos al inicio del proceso para comprobar si efectivamente se cumplieron.

## 4. Conclusiones

De acuerdo con el objetivo general y los objetivos específicos, se relacionarán a continuación cada uno de estos con la conclusión de cada punto, demostrando si las actividades realizadas cumplen con el planteamiento inicial de este proyecto.

- “Implementar un modelo base de conocimiento para la auditoría de seguridad en servicios web”. Con este proyecto se logró crear un modelo de base de conocimiento implementado sobre una herramienta libre, ejecutando una auditoría en seguridad de servicios web con SQL Injection sobre un prototipo organizacional.
- “Implementar metodologías y buenas prácticas en el tema de seguridad de la información”. Se logró establecer una metodología propia para el desarrollo del modelo propuesto, incluyendo metodologías ya definidas, métodos, buenas prácticas, técnicas, recomendaciones y tendencias actuales relacionadas con conceptos de base de conocimiento, auditoría de aplicaciones web, seguridad de la información y desarrollo de *software*.
- “Establecer una metodología propia para el modelo, con metodologías definidas, métodos y buenas prácticas”. En contexto con el anterior objetivo, se hicieron revisiones literarias sobre investigaciones en el tema y se estudiaron guías, técnicas y herramientas para llevar a cabo la auditoría en servicios web, determinando que para el vector de ataque SQL Injection, en el contexto establecido, la prevención no es responsabilidad del JSF. La forma de evitar el ataque depende del API de persistencia que se esté utilizando (JPA, para el caso), pero todo se reduce a que nunca se debe concatenar la entrada controlada por el usuario en cadenas SQL, siempre se debe usar consultas parametrizadas cuando corresponda.
- “Alimentar un *software* de base de conocimiento con datos resultantes de pruebas de Inyección SQL”. Se realizó la instalación, configuración y alimentación del software OpenKM, como herramienta que soporta el modelo propuesto, con los datos y la información resultante del proceso de auditoría de los servicios web en un prototipo definido.

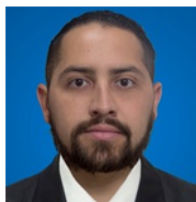
Finalmente, con la socialización de este modelo, se aclara que queda expuesto de manera libre para que sea usado e implementado por cualquier organización, entidad o personas y se pueda trabajar en proyectos futuros si así se quiere.

## Referencias

- [1] A. Au y W. Fung, “Knowledge Audit Model for Information Security”, en *8th International Conference on Innovation and Knowledge Management in Asia Pacific*, Kobe, octubre 2016. ↑265

- [2] J. L. Contreras, "Propuesta de auditoría a las aplicaciones web de la empresa C&M consultores aplicando herramientas de software libre", trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2017. ↑265, 274
- [3] S. Coronado, "Desarrollo de una guía metodológica basada en análisis SQL injection y formas de protección a las bases de datos", trabajo de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2017. ↑265
- [4] A. Sadeghian, M. Zamani y A. A. Manaf. "A Taxonomy of SQL Injection Detection and Prevention Techniques", en *Informatics and Creative Multimedia (ICICM)*, Kuala Lumpur, septiembre 2013. <https://doi.org/10.1109/ICICM.2013.18> ↑266
- [5] A. Sadeghian, M. Zamani, S. M. Abdullah, "A taxonomy of SQL Injection Attacks", en *International Conference on Informatics and Creative Multimedia*, Kuala Lumpur, septiembre 2013. ↑266
- [6] M. Rodríguez, "Auditoría de aplicaciones web: metodología y práctica profesional". [En línea]. Disponible en: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/40153/7/mrodriguezsanchez1TFC0115memoria.pdf> ↑266, 274, 278
- [7] G. Méndez y L. Álvarez, "Metodología para la construcción de la base de conocimiento de un sistema experto", *Revista Ingeniería*, vol. 8, n.º 2, pp. 12-18, 2003. <https://doi.org/10.14483/23448393.2686> ↑267, 280
- [8] E. A. Varela, D. Estrada y L. Acosta. "Wiki, herramienta informática para la base de conocimiento para el proyecto PROMEINFO de la Universidad de Guayaquil", *Dominio de las Ciencias Sociales*, vol. 3, n.º 3, pp. 702-727, 2017. <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v3i3.502> ↑267
- [9] Ministerio de las TIC [MinTIC]. "Modelo de seguridad y privacidad de la Información y Guía de auditoría de Seguridad y privacidad de la información", [En línea]. Disponible en: [https://www.mintic.gov.co/gestionti/615/articles-5482\\_Modelo\\_de\\_Seguridad\\_Privacidad.pdf](https://www.mintic.gov.co/gestionti/615/articles-5482_Modelo_de_Seguridad_Privacidad.pdf) ↑267
- [10] D. Guaman, F. Guaman, D. Jaramillo y M. Sucunuta, "Implementation of techniques and OWASP security recommendations to avoid SQL and XSS attacks using J2EE and WS-security", en *12<sup>th</sup> Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Lisbon, junio 2017. ↑267
- [11] ISO/IEC 27000, "Information technology - Security techniques - Information security management systems - Overview and vocabulary". [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:27000:ed-5:v1:en> ↑267
- [12] J. Singh, "Analysis of SQL Injection Detection Techniques", *Theoretical and Applied Informatics*, vol. 28, n.º 1-2, 2016. ↑268
- [13] IBM Corporation. "X-Force IRIS Data Breach Report". architecture". [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/security/resources/xforce/xfisi/>, 2019. ↑268
- [14] OpenKM, "Diagram of the system architecture". [En línea]. Disponible en: <https://www.openkm.com/en/architecture.html> ↑269
- [15] M. Shaw y D. Garlan, "Software Architecture: Perspectives on an emerging discipline". Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. ↑271
- [16] T. Gunawan, M. Lim, M. Kartiwi, N. Malik y N. Ismail, "Penetration testing using Kali linux: SQL injection, XSS, wordpress, and WPA2 attacks", *Gunawan*, vol. 12, n.º 2. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v12.i2.pp729-737> ↑274, 276
- [17] X. Liu, Q. Yu, X. Zhou y Q. Zhou, "OwlEye: An Advanced Detection System of Web Attacks Based on HMM", *IEEE 16<sup>th</sup> Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing*, Atenas, agosto 2018. ↑279

## John Edison Moreno



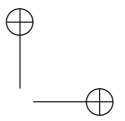
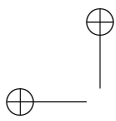
Recibió su grado en Ingeniería Telemática de la Universidad Distrital, Bogotá, Colombia, en 2012, su grado de especialista en Proyectos de Información de la Universidad Distrital, Bogotá, Colombia, en 2014 y el M.Sc. en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital, Bogotá, Colombia, en 2020. Actualmente trabaja como gestor de proyectos TI en la coordinación de desarrollo de sistemas de información en la DIAN – Dirección de impuestos y aduanas nacionales, donde se desempeña como ingeniero DevOps y Full-Stack. Sus principales intereses de investigación incluyen disciplinas de Ingeniería TI como Cloud, Integración Continua y Entrega Continua y Automatización de procesos y flujos de trabajo en el desarrollo de código fuente y las operaciones TI involucradas en éste. e-mail: jemorenom@correo.udistrital.edu.co

---

**Paulo Cesar Coronado**



Recibió su grado en Ingeniería Electrónica de la Universidad Distrital, Bogotá, Colombia, en 2004, su grado M.Sc. en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital, Bogotá, Colombia, en 2007 y actualmente cursando el Doctorado Interinstitucional en Educación de la Universidad Distrital, Bogotá, Colombia. Actualmente trabaja como profesor en asignaturas de Ingeniería y de Maestría en la Universidad Distrital. Sus principales líneas de interés incluyen: Sistemas de Información Geográfica, Aprendizaje de Máquina, Ambientes inmersivos, Telesalud, Tecnología educativa, Software Libre y de código abierto. Actualmente desarrollando: Proyecto de doctorado para explorar el uso de la realidad aumentada y mixta en procesos de enseñanza de programación de computadores. OpenSITEM Plus: Software de telesalud. También participando en: Modelo de Seguridad Informática con herramientas de código abierto, Aprendizaje de máquina para la identificación de vulnerabilidades en procesos de enseñanza y Metamodelo de arquitectura empresarial para entidades públicas.  
e-mail: paulo\_cesar@udistrital.edu.co






Research

REVISTA  
Ingeniería

## Analysis for Selection of Battery-Based Storage Systems for Electrical Microgrids

*Análisis para la selección de sistemas de almacenamiento basados en baterías para microrredes eléctricas*

Rafael Antonio Peña Suesca <sup>\*</sup>,<sup>1</sup> Andrés I. Santos León <sup>1</sup>, César Leonardo Trujillo Rodríguez <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía - Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia).

\*Correspondence e-mail: cltrujillo@udistrital.edu.co

Recibido: 27/11/2019. Modificado: 31/07/2020. Aceptado: 06/08/2020.

### Abstract

**Context:** In the implementation of a microgrid, the most expensive element is the energy storage system, which consists of batteries in most cases. Different authors, motivated to reduce the implementation costs that allow the widespread use of microgrids, have dedicated their efforts to develop techniques and topologies for microgrids, in order to optimize the energy storage system, seeking the compromise between useful life, maintenance, and initial investment.

**Method:** The objective of this paper is to present the selection criteria used to select the type of battery in a microgrid, these being sufficient to ensure economic viability throughout the entire lifecycle of the system. To achieve this objective, papers indexed in journals of scientific and engineering content were consulted, classifying the criteria into two groups: technical criteria and technical-economic criteria.

**Results:** It was established that the criteria ensure compliance with the technical characteristics required by the end-user of the micro-network, but they do not consider the operation of the storage system throughout its useful life. In contrast, the technical-economic criteria allow guaranteeing the operation of the microgrid storage system throughout the entire duration of the project.

**Conclusions:** The classification of the criteria in this paper is a guide that allows motivating the progress of research to establish methodologies that guarantee viable implementation costs at the microgrid level, based on the technical-economic analysis of the storage system.

**Keywords:** Batteries, microgrids, storage systems.

**Language:** Spanish

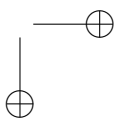
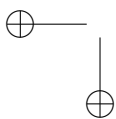
Open access



Cite this paper as: R. Peña, A. Santos y C. Trujillo "Análisis para la selección de sistemas de almacenamiento basados en baterías para microrredes eléctricas", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 284-304 (2020).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.15613>



### Resumen

**Contexto:** En la implementación de una microrred, la parte más costosa es el sistema de almacenamiento de energía, el cual, en la mayoría de casos, está conformado por baterías. Diferentes autores, motivados por reducir los costos de implementación y permitir el uso generalizado de las microrredes, han dedicado sus esfuerzos a desarrollar técnicas y topologías de microrred para optimizar el sistema de almacenamiento de energía, buscando el compromiso entre vida útil, mantenimiento e inversión inicial.

**Método:** El objetivo del presente artículo es presentar los criterios de selección que se utilizan para escoger el tipo de batería en una microrred, siendo estos suficientes para asegurar la viabilidad económica a lo largo del ciclo de vida del sistema. Para alcanzar dicho objetivo, se consultaron artículos indexados en revistas de contenido científico y de ingeniería, clasificando los criterios en dos grupos: criterios técnicos y criterios técnico-económicos.

**Resultados:** Se pudo establecer que los criterios aseguran el cumplimiento de las características técnicas que requiere el usuario final de la microrred, pero no consideran la operación del sistema de almacenamiento a lo largo de la vida útil. En contraste, los criterios técnico-económicos permiten garantizar el funcionamiento del sistema de almacenamiento de la microrred a lo largo de toda la duración del proyecto.

**Conclusiones:** La clasificación de criterios en este artículo es una guía que permite motivar el avance de investigaciones para de establecer metodologías que garanticen costos de implementación viables a nivel de microrredes, partiendo del análisis técnico-económico del sistema de almacenamiento.

**Palabras clave:** Baterías, microrredes, sistemas de almacenamiento.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

El problema del cambio climático y la naturaleza finita de los combustibles fósiles, los cuales se utilizan para el suministro de energía eléctrica en diferentes escenarios como las poblaciones que no tienen acceso a la red eléctrica tradicional, ha impulsado el uso de las fuentes no convencionales de energía como los sistemas solares fotovoltaicos, sistemas eólicos, entre otros. Uno de los grandes retos del uso de este tipo de fuentes no convencionales de energía es la intermitencia de generación de energía propia de la variabilidad natural de la fuente primaria de energía como el sol y el viento. Los sistemas de almacenamiento de energía aparecen como sistemas que permiten mitigar este problema, asegurando confiabilidad y calidad en el suministro de energía [1].

El almacenamiento de energía se puede realizar de diferentes maneras utilizando sistemas mecánicos, neumáticos, térmicos y electroquímicos, entre otros. Los sistemas electroquímicos, los cuales pueden considerarse como arreglos de baterías, son un tipo de tecnología investigado de forma constante en los últimos años dadas sus características de densidad de potencia y energía [2].

Una de las formas en las que las fuentes no convencionales de energía, los sistemas de almacenamiento con baterías y otros sistemas interactúan bajo un esquema controlable y gestionable se denomina microrred. Las microrredes se pueden clasificar según el tipo de tensión en el punto común, donde convergen los diferentes subsistemas, como microrredes DC, AC o híbridas [3]. Según los objetivos de la microrred, el sistema de almacenamiento de energía juega un papel fundamental tanto técnica como económicamente.

Este trabajo presenta una revisión de los criterios de selección que se utilizan para determinar el tipo de batería que se utiliza en microrredes eléctricas. Cabe resaltar que las microrredes tipo DC e híbridas tienen la particularidad, desde el punto de vista técnico, de presentar una interfaz de tensión DC natural para diferentes subsistemas como generadores solares fotovoltaicos, sistemas de almacenamiento con baterías y cargas como iluminación LED, subsistemas de implementación viables a nivel residencial, lo que hace fundamental identificar el tipo de sistema de almacenamiento de energía inmerso en la microrred.

El presente artículo se divide en seis secciones, en la segunda sección se hace una descripción y análisis de las principales tecnologías de almacenamiento que eventualmente podrían hacer parte de una microrred, la tercera sección presenta los diferentes tipos de baterías existentes en el mercado utilizadas en los sistemas de almacenamiento, la cuarta sección expone los criterios de selección de tipo de baterías, desde un enfoque técnico y técnicoeconómico, para ser utilizadas en el contexto de las microrredes eléctricas. La quinta sección da un panorama general del manejo de residuos producto de los sistemas de almacenamiento basados en baterías. La última sección presenta la discusión final y las conclusiones.

## 2. Descripción y análisis de las principales tecnologías de almacenamiento

Las tecnologías de almacenamiento de energía a menudo son clasificadas en tres categorías de acuerdo con la longitud de la descarga [4]: de calidad de potencia, cuando la longitud de la descarga es corta, de segundos a minutos, por ejemplo en control y regulación de frecuencia; de potencia puente, cuando la longitud de la descarga es intermedia, entre minutos y una hora, por ejemplo, para cubrir el gap entre una contingencia y el encendido de otra fuente; de gestión de energía, cuando la longitud de la descarga es más larga.

En la Figura 1, se muestran los principales sistemas comerciales de almacenamiento de energía.

En la Tabla I, se muestra una clasificación de los diferentes sistemas de almacenamiento de energía dependiendo de si este se realiza de forma mecánica, eléctrica o electroquímica.

**Tabla I.** Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía

Tipo de almacenamiento	Sistema correspondiente	Wh/Kg	Eficiencia (%)
Mecánico	Almacenamiento por bombeo de agua (PSH) [5].	0,5-1,5	70-85
	Almacenamiento por aire comprimido (CAES) [6].	30-60	>60
	Almacenamiento en volantes de inercia (FW) [7].	5-100	90-95
Eléctrico	Almacenamiento en ultra capacitores (EDLC) [8].	5-8	84-97
Electroquímico	Almacenamiento en baterías [9].	30-265	60-95

Los sistemas de almacenamiento PSH (por sus siglas en inglés de *Pumped-Storage Hydroelectricity*) y CAES (por sus siglas en inglés de *Compressed Air Energy Storage*) son sistemas que requieren de condiciones geográficas apropiadas y son demasiado grandes y costosos para las potencias

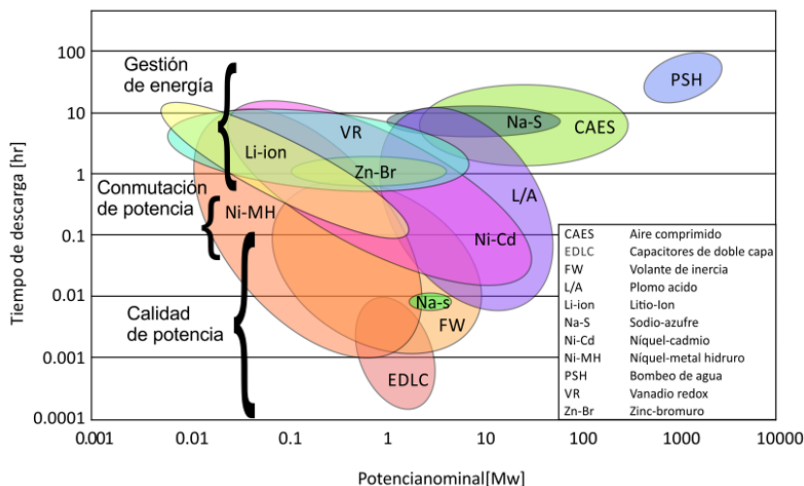


Figura 1. Aplicaciones y tecnologías de almacenamiento de energía [4].

que se manejan en las microrredes. Por otra parte, los FW son sistemas que pueden suministrar suficiente potencia en un periodo de tiempo corto y, por ello, se utilizan en descargas cortas orientadas a mantener la calidad de la potencia. No suelen ser utilizados como sistemas de respaldo de energía a menos que se usen junto a otros sistemas de almacenamiento. Los EDLC (por sus siglas en inglés de *Electric Double-Layer Capacitor*) tienen una alta densidad de potencia y tiempos cortos de carga comparados con las baterías; habitualmente operan con otros sistemas de almacenamiento de energía. Las baterías, por su parte, tienen unas características que las hacen propicias para operar en microrredes eléctricas, las cuales se abordarán en la siguiente sección.

### 3. Tipos de baterías eléctricas

Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en microrredes eléctricas en su mayoría están conformadas por módulos electroquímicos, es decir, baterías. Esto se puede explicar, al menos desde el punto de vista técnico, puesto que las baterías han sido una tecnología en constante desarrollo desde su descubrimiento en el año 1000 a. c., como se puede apreciar en el resumen de línea de tiempo presentado en [10]. El desarrollo de esta tecnología también se ha visto impulsada por los subsidios que diferentes países han implementado para el financiamiento de los sistemas de almacenamiento de energía con baterías como se presenta en [11], [12]. Otro incentivo que se tiene para el desarrollo de sistemas de almacenamiento con baterías en este contexto es la mitigación ciertos fenómenos que afectan a la red tradicional cuando la microrred opera en modo red. Una revisión de este tipo de fenómenos se presenta en [13].

La batería eléctrica se trata de un dispositivo conformado por una o varias celdas con características electroquímicas capaces de convertir la energía química almacenada en energía eléctrica. Cada celda se caracteriza por estar conformada por un cátodo (electrodo positivo), un ánodo (electrodo



negativo) y un electrolito, el cual permite que los iones se muevan desde un electrodo hasta el otro, posibilitando el flujo de corriente fuera de la batería [14]. Es posible encontrar un sin número de baterías de distinta fabricación que ofrecen diferentes prestaciones. En seguida se presentan las más representativas en el mercado y que presentan mejores ventajas para su aplicación en microrredes eléctricas.

- **Batería de plomo ácido (Pb).**

Es la batería más común, ampliamente usada en vehículos convencionales, utilizadas como batería de arranque. Las tensiones habituales son 6 V, 12 V u otro múltiplo de 2, ya que la tensión suministrada por cada celda es de 2 V. La densidad de energía capaz de aportar es de 30 Wh/kg. Está compuesta por un par de electrodos de plomo, así que, cuando no se encuentra cargada se presenta como sulfato de plomo II ( $\text{PbSO}_4$ ) insertado en una matriz de plomo metálico sobre el elemento metálico (Pb). El electrolito se caracteriza por ser una disolución de ácido sulfúrico [9].

Se destaca por ser una batería de bajo costo y fácil fabricación, siendo muy útil para un uso como acumuladores en sistemas de microrredes eléctricas. Por el contrario, la no admisión de sobrecargas ni descargas profundas, como su excesivo peso, la toxicidad del plomo y su lenta recarga, hace que no sean las más adecuadas para este tipo de aplicaciones.

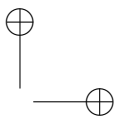
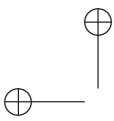
- **Batería níquel-hidruro metálico (Ni-MH).**

Es un tipo de batería recargable que emplea un ánodo de oxihidróxido de níquel ( $\text{NiOOH}$ ) y un cátodo de una aleación de hidruro metálico. Fue inventada con la idea de sustituir al cadmio en las baterías de Ni-Cd por una aleación que almacena hidrógeno. Una pila de Ni-MH es capaz de producir una tensión de 1,2 V para una capacidad que oscila entre 0,8 y 2,9 Ah. La densidad de energía aproximada alcanza los 80 Wh/kg, mientras que los ciclos de carga varían entre las 500 y 700 cargas, lo que supone un ciclo de vida superior a las baterías de plomo ácido.

En términos del efecto memoria, entendido como el fenómeno que restringe el uso de toda la energía por la limitación de la tensión o la capacidad de la recarga, en razón de fenómenos como tiempos prolongados en los procesos de carga-descarga y corrientes y temperaturas elevadas, la afectación sobre este tipo de baterías es menor. Son usadas en vehículos eléctricos híbridos como baterías de tracción, ordenadores portátiles, cámaras de video, relojes, radios y algunos teléfonos móviles. Por otra parte, las baterías de Ni-MH presentan una tasa de autodescarga del 30 % mensual comparadas con el 20 % que presentan las de NiCd, desplazando estas últimas a usos donde se presentan prolongados periodos entre consumos, por ejemplo, luces de emergencia, controles remotos, etc., dejando a las baterías de Ni-MH en aplicaciones donde se tienen consumos continuos de energía [14].

- **Batería de sulfuro de sodio.**

Este grupo de baterías aún se encuentran en su fase experimental por Ford Motor Company. Están compuestas de tubos electrolíticos de óxido de aluminio cerámicos con electrodos negativos de sodio y electrodos positivos de sodio fundido en medio de un contenedor aislado y sellado. Para



mantener el sulfuro fundido, la temperatura de la batería debe estar entre unos 300° y 350°. Estas baterías tendrían un costo de, aproximadamente, siete veces lo que costaría una batería de plomo ácido [15].

- Batería de litio-hierro.

Desarrollada por Sony Corporation y evaluadas por Nissan. Entre sus más sobresalientes características se encuentran los bajos efectos de memoria, alta energía específica de 100 Wh/Kg, alta potencia específica de 300 W/Kg y una vida útil de aproximadamente unos 1000 ciclos de carga. Estas baterías fabricadas para operar a 28,8 V consisten de ocho celdas cilíndricas metálicas cubiertas en un módulo de resina, cada batería tiene incorporado un controlador en la celda para verificar que está operando en un rango de 2,5 V a 4,2 V durante la carga y descarga. Esta batería presenta las desventajas de tener un alto costo en su construcción debido al uso de un material compuesto de óxido de cobalto para el ánodo y la alta pureza de un material orgánico usado en el electrolito, además de la necesidad de un sistema de ventilación para mantener frías las baterías [16].

- Baterías de níquel-zinc.

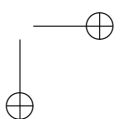
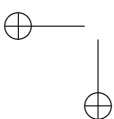
Estas emplean un electrodo positivo igual que el empleado en las baterías de NiCd y níquel-hierro junto con un electrodo negativo compuesto de zinc. Adicionalmente, utiliza una solución de hidróxido de potasio acuosa, como electrolito. Entre las ventajas a destacar de estas baterías se encuentra su relativamente elevada tensión por celda, aproximadamente 1,6 V, manteniendo la tensión constante durante una buena parte del ciclo de descarga. Adicionalmente, su alta densidad de energía que supera los 100 Wh/l, una energía específica aceptable de alrededor de 50 Wh/Kg. Finalmente, el funcionamiento a bajas temperaturas y su precio resultan ser características muy atractivas [17].

- Baterías de níquel-hierro.

Estas baterías usan un electrodo positivo de níquel sumergido en un electrolito de hidróxido de potasio como las baterías de níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico. El material activo del electrodo es el hierro, el cual tiene características atractivas, por ejemplo, su costo y su estabilidad electroquímica. Las desventajas con estas tecnologías están relacionadas con el excesivo calentamiento de la batería en razón de la producción primigenia de hidrógeno durante los ciclos de carga, lo cual implica una disminución drástica de la eficiencia energética en el proceso de carga-descarga. Otras desventajas son su alto costo, razón de autodescarga elevada y un mal funcionamiento a bajas temperaturas [15].

- Baterías de níquel-cadmio (NiCd).

Estas baterías usan como electrolito una solución acuosa de una base, más exactamente hidróxido de potasio, diferente a las de plomo ácido que usan una solución ácida. Como consecuencia de dicha elaboración, presenta características de baja temperatura para su funcionamiento y permite que sea sellado herméticamente, lo cual resulta conveniente teniendo en cuenta la toxicidad de sus elementos [18].



Dentro de las ventajas que se destacan para este grupo de baterías se encuentra que, al estar el electrolito formado por hidróxido de potasio, no forma parte de las reacciones electroquímicas que tienen lugar en el proceso, haciendo que su concentración no varíe durante los procesos de descarga o recarga, por lo que su tensión varía poco en el proceso de descarga. De igual manera, presentan alta densidad de energía, de alrededor 90 Wh/l y una alta energía específica de aproximadamente 60 Wh/Kg, permitiéndoles así tener un elevado ciclo de vida.

Otro rasgo atractivo de estas baterías es que, después de las baterías de plomo ácido, las baterías de níquel- cadmio son las de mayor posicionamiento en el mercado.

En cuanto a los inconvenientes de adquisición, se encuentra su elevado precio respecto a las de ácido plomo, pues el níquel es un elemento costoso. Asimismo, la tensión máxima lograda por celda es de alrededor de 1,2 V, lo que resulta inferior respecto a las celdas de otros materiales, conllevando al uso de un mayor número de las mismas para la construcción de una batería. También tienden a recalentarse durante su funcionamiento, lo que afecta su rendimiento. Finalmente, a causa del uso de componentes tóxicos en su fabricación, especialmente el cadmio, resulta de difícil reciclaje y, por ende, dañino para el medio ambiente.

- Baterías de Li-ion.

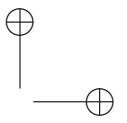
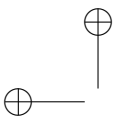
Esta tecnología se ha convertido en la más importante en equipos móviles y portátiles. El alto nivel de tensión de las celdas de hasta 3,7 V facilita arreglos de menos celdas en serie para alcanzar las tensiones requeridas en las aplicaciones. En estas baterías, el cátodo está hecho de óxido metálico de litio ( $\text{LiCoO}_2$  o  $\text{LiMO}_2$ ) y el ánodo de carbón grafito. El electrolito son soluciones carbonatadas no acuosas.

Las principales ventajas son la densidad alta de energía (75-200 Wh/kg), elevada eficiencia (90-97 %), flexibilidad en tiempos de descarga (segundos o semanas), elevado promedio de ciclos completos de vida útil (1000-10.000), baja autodescarga (8 % al mes) y operación en rangos amplios de temperatura (-20 a 60 °C para la carga y -40 a 60 °C para la descarga) [19].

Las mayores desventajas son el alto costo (\$ 600/kWh) debido al empaque especial y a los circuitos internos de protección. La inestabilidad térmica de su electrodo positivo (óxido metálico), el cual puede descomponerse a elevadas temperaturas, liberando oxígeno y produciendo así mayores fugas térmicas. Muchas investigaciones se centran sobre materiales para el cátodo.

Los temas de seguridad exigen especial cuidado y para minimizar el riesgo. Estas baterías se equipan con unidades de monitoreo que evitan sobrecargas y descargas excesivas. Usualmente se instalan circuitos que monitorean la tensión individual de cada celda y evitan que se presenten desviaciones de tensión entre ellas.

Debido al alto costo, compiten con las baterías de plomo ácido solo en casos especiales, por ejemplo, en aplicaciones que requieran descargas fuertes en tiempos cortos [16].



## 4. Selección de tecnología de baterías para microrredes

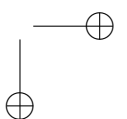
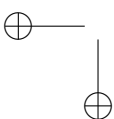
De las diferentes tecnologías de baterías disponibles, las baterías de plomo ácido se han utilizado de forma continua en las microrredes eléctricas, esto se debe al hecho de que es una tecnología madura, la cual ha alcanzado costos viables para los proyectos. Otros tipos de baterías también se pueden encontrar en microrredes, dentro de estas tecnologías cabe resaltar la tecnología de Li-ion que ofrece características de densidad de potencia y energía, lo cual la hace viable técnicamente para conformar sistemas de almacenamiento en microrredes. La viabilidad económica de implementación de sistemas de almacenamiento con baterías de Li-ion se ha alcanzado como una consecuencia directa del decrecimiento en costos de esta tecnología, este cambio en costos se presenta en [20].

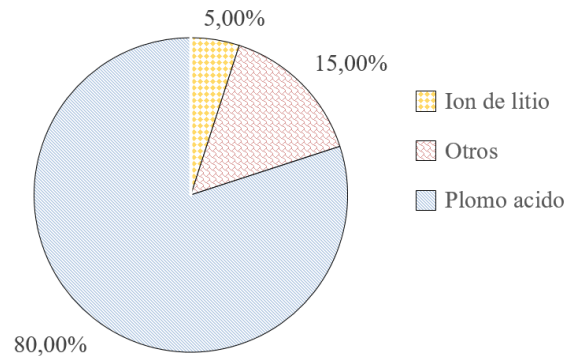
Tomando como referencia la recopilación de trabajos presentada en [21] se elaboró la Figura 2, la cual agrupa los trabajos [22]–[39] que se encuentran en la ventana de tiempo 2011-2018 según el tipo de batería utilizada. Se aprecia claramente en la Figura 2 cómo los sistemas de almacenamiento basados en baterías de plomo ácido son la tendencia dominante; sin embargo, se resalta la fracción que corresponde a los sistemas de almacenamiento conformados por baterías de Li-ion, tecnología que empieza a alcanzar costos que hacen su implementación viable en microrredes eléctricas.

Existen diferentes criterios para la selección del tipo de batería a utilizar en la microrred eléctrica. Los criterios se pueden dividir en dos grupos: criterios técnicos y económicos. Los criterios técnicos corresponden al análisis de una serie de parámetros técnicos como, por ejemplo, densidad de potencia, densidad de energía, entre otros. Por otro lado, al considerar que el sistema de almacenamiento de energía de la microrred puede llegar a hasta el 50 % del costo total de la microrred, el análisis que considera parámetros técnicos y económicos de forma simultánea se hace necesario para garantizar un punto de equilibrio entre las características técnicas del sistema de almacenamiento y su costo a lo largo de toda su vida útil.

### 4.1. Criterios técnicos

En los trabajos [40] y [41], la tasa de descarga y carga del sistema de batería se analiza como una función de la potencia entregada por el sistema de generación solar fotovoltaico y por la potencia demanda por la carga. En [41] se desarrolla una simulación considerando un sistema de almacenamiento con baterías de fosfato de hierro de litio (Li-iron), tecnología en la cual el cátodo de la batería está formado por un fosfato de hierro de litio. Este tipo de batería es más estable y tiene mayor vida útil que las baterías de litio, pues en estas el cátodo está compuesto por un óxido de cobalto o por un óxido de manganeso-litio, compuestos tradicionales en las baterías de ion de litio. En [42] y [43] se argumentan algunas de las ventajas de las baterías de litio con electrodos compuestos por óxidos y dióxidos metálicos, desde el enfoque de que estos materiales son capaces de tolerar el estrés de los cambios de volumen que implican los ciclos de carga y descarga de la batería, de tal forma que se logra una mayor vida útil con mayores capacidades y un aumento en la tensión por celda. En estos trabajos, es claro que la selección de la batería se realizó en función de obtener las mejores características posibles en las baterías del sistema de almacenamiento.





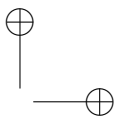
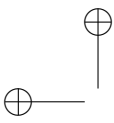
**Figura 2.** Tipos de baterías utilizados en diferentes proyectos de microrredes Fuente: elaboración propia con base en [22]–[39].

Por otro lado, en [40] se desarrolla un sistema de gestión inteligente de energía en el cual la batería se modela con un esquema circuital, donde también se considera la dinámica de la batería. Este sistema de gestión optimiza el uso de los diferentes sistemas de almacenamiento de energía con baterías, de tal forma que las pérdidas de energía en las líneas de transmisión sean mínimas. Así, la selección del tipo de batería es una función directa de los objetivos de control programados en el sistema de gestión.

La topología de la microrred en cuanto a la posición del sistema de almacenamiento también es un parámetro técnico relevante. En [44], se demuestra, mediante un caso de estudio de una microrred residencial en India, que se requiere un 1,55 % de energía menos en el sistema centralizado de baterías en comparación con una microrred con el sistema de almacenamiento distribuido. El caso de estudio considera cinco perfiles de carga diferentes, uno por cada casa que conforma la microrred, y un sistema de generación fotovoltaica por casa como única fuente de energía no convencional. En este trabajo también se hace referencia a otros parámetros técnicos para la selección de la batería como la capacidad nominal, el tiempo de carga y el estrés que se genera en la batería en el intercambio de energía con la microrred.

Por otro lado, en el trabajo desarrollado en [45] se presenta una metodología de optimización del banco de baterías de Li-ion para una microrred DC (corriente continua, por sus siglas en inglés) con conexión a red en función de parámetros como costo diario de la electricidad comprada de la red y degradación del banco de baterías. Si bien el anterior trabajo considera parámetros de naturaleza técnica y económica, la selección del tamaño del banco de baterías depende de la estrategia de control, descentralizado para la operación estable y autónoma que se propone en el trabajo. Lo anterior implica directamente que la metodología con la que se escoge el tamaño del banco de baterías es de carácter técnico, dado que no existe un compromiso general desde el diseño entre los parámetros técnicos y económicos considerados.

Otra alternativa para el diseño del sistema de almacenamiento de energía de la microrred, considerando parámetros técnicos, es partir de estrategias de control propuestas que tengan dentro de sus objetivos la operación adecuada de la batería. Con un conjunto de estrategias de control de este tipo



es posible determinar el tipo de batería más conveniente en función de los requerimientos técnicos de la microrred y las capacidades de cada uno de los esquemas de control disponibles. Por ejemplo, se podría utilizar el esquema de control propuesto en [46] para determinar el tipo de batería más conviene en función de las características técnicas que se requieren en la microrred.

Metodologías alternas se pueden adaptar de trabajos en los cuales el sistema de almacenamiento no hace parte de una microrred, pero en la metodología considera parámetros técnicos de interés como mantenimiento del sistema de almacenamiento y ventilación del mismo. Un ejemplo de un trabajo de este tipo se puede encontrar en [47]. En este trabajo se desarrolla un modelo para optimizar el tamaño de un sistema de almacenamiento de baterías de plomo ácido, utilizado como sistema de respaldo en una subestación de transmisión. Si bien este trabajo no se realiza directamente sobre una microrred, sí proporciona herramientas para considerar parámetros técnicos de instalación como la refrigeración del sistema de almacenamiento.

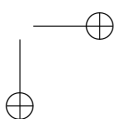
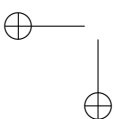
La selección del sistema de almacenamiento de energía de una microrred también puede considerar el uso en particular para el cual se implementa la microrred, por ejemplo, en [48] se considera una microrred compuesta por un sistema solar fotovoltaico y un sistema de almacenamiento de energía con baterías. Esta microrred tiene como propósito específico aumentar la capacidad de adaptación a desastres naturales que tiene el sistema de distribución al cual se encuentra conectada. En este escenario en particular, en el cual la microrred tiene un propósito tan específico, los autores resaltan la importancia de las acciones de gestión sobre el sistema de almacenamiento basado en baterías. Trabajos de este tipo aportan nuevas herramientas para desarrollar o complementar metodologías de selección y dimensionamiento de sistemas de almacenamiento con baterías para microrredes, con parámetros técnicos que permitan considerar escenarios especiales como los desastres naturales o condiciones ambientales críticas para los sistemas de distribución.

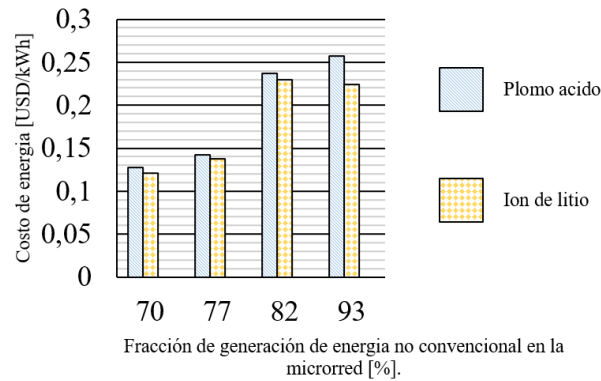
Un enfoque técnico diferente para la selección del tamaño del banco de baterías utilizado en una microrred se plantea en [49], trabajo en el cual se propone un esquema de control para un sistema de almacenamiento híbrido formado por baterías y un sistema de almacenamiento magnético con un superconductor. En este trabajo, el dimensionamiento del banco de baterías parte del esquema de control propuesto, el cual tiene como objetivo responder a los cambios abruptos de potencia que se generan en la microrred cuando esta se conecta y desconecta de la red.

## 4.2. Criterios técnico-económicos

Considerando que el sistema de almacenamiento de energía con baterías puede ser la parte más costosa de la microrred, una combinación de parámetros técnicos y económicos para la selección del tipo de batería es una opción conveniente frente al aseguramiento de su viabilidad.

En el trabajo que se presenta en [21] se puede encontrar un análisis técnico-económico del rendimiento de dos tecnologías de baterías populares hoy en día, las baterías de plomo ácido, una tecnología madura, y las baterías de Li-ion, una tecnología joven. En este trabajo se desarrolla un modelo de optimización para una microrred aislada y conectada a red en escenarios rurales y urbanos. Con el uso del *software* HOMER-2018 (13.11.3) se compara el rendimiento técnico-económico de las baterías de plomo ácido y ion de litio bajo perfiles de carga realísticos. Dentro de





**Figura 3.** Costo de energía en función del tipo de batería utilizado y del porcentaje de energía renovable en el la microrred [21]

las conclusiones del estudio se puede encontrar que para ambos tipos de baterías la utilización es más baja con la microrred conectada a red que con la microrred operando en modo isla, además, las baterías de Li-ion tienen un nivel de pérdidas menor que las baterías de plomo ácido con un ciclo de vida más largo en comparación con estas últimas. Considerando lo anterior, los autores presentan como conclusión final el hecho de haber demostrado que a nivel residencial las baterías de Li-ion son una alternativa viable tanto técnica como económicamente para los sistemas de almacenamiento en microrredes residenciales. Técnicamente estas baterías presentaron algunas de las siguientes ventajas sobre la tecnología de plomo ácido: mantenimiento reducido, rápida tasa de carga, volumen reducido, mayor vida útil y menor costo de energía para diferentes porcentajes de generación con energía no convencional. Lo anterior se evidencia en la Figura 3.

En la Figura 3 también es interesante notar cómo la diferencia en el valor de la energía entre la microrred con sistema de almacenamiento a partir de baterías de Li-ion y la microrred con sistema de almacenamiento a partir de baterías de plomo ácido aumenta, siendo menor en la microrred con baterías de Li-ion, a medida que el porcentaje de energía generada en la microrred es de tipo no convencional.

El enfoque tecnoeconómico para la selección del tipo de batería para el sistema de almacenamiento de la microrred DC domiciliaria ha sido trabajado desde el desarrollo de expresiones matemáticas que permiten cuantificar el costo de ciclo de vida para cada tipo de batería. El costo de ciclo de vida modela el costo total que representa el sistema de almacenamiento con baterías. En [50]–[54] se desarrollan expresiones matemáticas que cuantifican este costo de vida en función de diferentes parámetros técnicos como profundidad de descarga (DOD), ciclos de usos a determinados DOD, eficiencia del almacenamiento de energía, entre otros.

Otros trabajos como el desarrollado en [55] consideran escenarios donde la microrred cuenta con conexión a red y existe un intercambio de energía con esta. En este caso, se plantea un problema de optimización para maximizar tanto el beneficio del propietario de la microrred como el beneficio del operador de red. El modelo considera parámetros relacionados con la selección y tamaño del

sistema de almacenamiento de energía utilizado por la microrred como el precio de la degradación, el número de baterías, la potencia de carga y descarga de las baterías, y la eficiencia durante carga y descarga. Cabe resaltar que en este trabajo también se considera la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que le proporciona un componente ambiental.

Otras formas de considerar criterios de selección de sistemas de almacenamiento de energía técnico-económicos se encuentran en los trabajos desarrollados con herramientas de análisis como HOMER (optimización híbrida de múltiples fuentes de energía renovables). Un ejemplo de este tipo de trabajos es el que se desarrolla en [56]–[60]. En el trabajo presentado en [57] se concluye que, para varios escenarios de microrred en Iran, el uso de baterías no es viable, dado que no existen políticas gubernamentales para tarifas preferenciales de la energía vendida a la red desde sistemas de almacenamiento de energía con baterías, la vida útil de la batería y los costos de reemplazo de las baterías.

Por otro lado, en [58] se utiliza HOMER para analizar diferentes parámetros técnicos y económicos de la microrred, incluyendo parámetros relacionados directamente con las baterías que forman el sistema de almacenamiento cuando se cambia la estrategia de control que se utiliza en la microrred para un caso de estudio en Iraq. En [59], se diseña una microrred bajo los criterios técnico-económicos que considera el *software* para un área residencial en Pakistán. En este trabajo, se desarrollan nueve casos de estudio basados en diferentes combinaciones de fuentes de energía como: solar fotovoltaica, eólica y diésel, en conjunto con un sistema de almacenamiento de energía con baterías. La novedad de este trabajo radica en la utilización en conjunto de los simuladores HOMER y MATLAB/Simulink, encargándose este último del modelado para el diseño óptimo, considerando parámetros técnicos como tensiones en los buses, rango de operación seguro del banco de baterías y balance de potencia activa.

El uso del *software* HOMER se presenta una vez más en el trabajo desarrollado en [60]. En contraste con el trabajo antes presentado, en este caso se tienen tanques de almacenamiento de hidrógeno como elemento almacenador de energía. En este trabajo se consideran tres diferentes escenarios para un caso de estudio en Australia, donde dos de los tres escenarios considerados incluyen un banco de baterías de Li-ion como sistema de almacenamiento de energía. Al final, los autores concluyen, a través de simulación, que el sistema más óptimo, con las consideraciones técnicas y económicas del *software* HOMER implica una microrred con sistema de almacenamiento de energía híbrido que incluye baterías de Li-ion y celdas de combustible en conjunto con un sistema de almacenamiento de hidrógeno y un electrolizador.

La selección y dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía para una microrred también debería considerar los factores climáticos, en especial cuando se consideran zonas geográficas con condiciones climáticas adversas como las zonas árticas. Un ejemplo de la selección y optimización de una microrred con sistema de almacenamiento de energía con baterías en una zona ártica se presenta en [61]. En este trabajo, se presenta un algoritmo de optimización genético que hace frente a las compensaciones necesarias que requiere el diseño del sistema al considerar las condiciones adversas de la región, ello al tiempo que selecciona la mejor configuración del sistema bajo parámetros técnicos, como la degradación de las baterías, y económicos, como el costo del combustible utilizado por el generador diésel de la microrred.



La selección del tamaño del banco de baterías para una microrred también puede abordarse desde un enfoque en el que se considere el despacho de energía desde la microrred hacia la red. Un ejemplo de este enfoque es el trabajo que se presenta en [62], un despacho inteligente de energía que tiene como objetivo maximizar el beneficio derivado del intercambio de energía con la red, al tiempo se considera la vida útil de las baterías. El trabajo también presenta un algoritmo para optimizar el tamaño del banco de baterías en función de los objetivos antes mencionados. Este tipo de investigaciones proporcionan una perspectiva diferente para abordar futuros trabajos en los cuales se considere —en la selección del tipo y cantidad de baterías— la operación comercial de la microrred.

La selección del tamaño óptimo del banco de baterías también puede abordarse con parámetros técnico-económicos de una forma probabilística. Ejemplos de este tipo de desarrollos son los trabajos presentados en [63]–[66]. En este grupo de trabajos el tamaño del banco de baterías considera parámetros como cambios en la demanda, la incertidumbre en la determinación del SOC, costo de operación de la microrred, precios de la energía, entre otros.

De forma similar, la determinación del tamaño del banco de baterías se puede establecer con un enfoque estocástico, como se aborda en los trabajos [67]–[71]. En este tipo de trabajo se consideran parámetros como la incertidumbre asociada a las fuentes de energía renovable, las emisiones de efecto invernadero, escenarios de conexión y no conexión a la red, y diferentes modos de operación en la microrred.

Los trabajos con enfoques probabilísticos y estocásticos pueden resultar útiles en desarrollos futuros en los que se incluyan en estos enfoques no solo el tamaño del banco de baterías, sino que también se considere el tipo de batería como una de las variables a determinar.

En la Tabla II, se presenta una clasificación técnico-económica de los principales trabajos enfocados a la selección de baterías para microrredes eléctricas.

## 5. Reciclaje de las baterías

Si bien la literatura científica donde se trata en detalle el reciclaje y disposición final de las baterías no es muy abundante, en [72] se presenta un panorama general que toma como referencia estudios de mercado desarrollados por empresas privadas. En este panorama se establece, como debería ser responsabilidad de cada fabricante de baterías, la correspondiente gestión para el reciclaje o disposición final de las baterías. El trabajo deja en claro que los mecanismos de disposición final o reutilización de las baterías depende del tipo de batería. Por ejemplo, en el caso de las baterías de plomo ácido se tienen a disposición todo un conjunto de empresas que se dedican exclusivamente a separar los materiales que conforman la batería y convertirlos en materias primas útiles.

En el caso de las baterías de Li-ion se opta, en primera instancia, por dar una segunda vida a las baterías, este es el caso de las baterías de los vehículos eléctricos. Cuando esto no es posible, se cuenta con un mercado más reducido para optar por la separación de los componentes que conforman la batería, también es importante resaltar que baterías como las Na-S y Na-NiCl<sub>2</sub> no cuentan con procesos de reciclaje. Otro aporte interesante de este trabajo es el de establecer la

**Tabla II.** Principales trabajos enfocados a la clasificación de sistemas de almacenamiento de energía para microrredes eléctricas.

Clasificación	¿Se propone estrategia de control?	¿Se propone sistema de administración?	¿Se propone algoritmo de optimización?	Parámetros considerados	Referencias
Técnica	No	Sí	No	Tasa de carga y descarga de la batería.	[40], [41]
Técnica	No	No	No	Vida útil y tensión por celda.	[42], [43]
Técnica	Sí	No	No	Disposición del banco de baterías.	[44]
Técnica	Sí	No	No	Degradación de la batería. Costo de la energía.	[45]
Técnica	Sí	No	No	Tasa de carga y descarga de la batería.	[46]
Técnica	Sí	No	No	Mantenimiento de las baterías. Ventilación de las baterías.	[47]
Técnica	No	No	No	Capacidad de adaptación que tiene la red, a la que se encuentra conectada la microrred, ante desastres naturales.	[48]
Técnica	Sí	No	No	Sistema de almacenamiento híbrido de baterías y sistema magnético con superconductor. Degradación de la batería durante la conexión y desconexión de la microrred a la red.	[49]
Técnico-económica	No	No	No	Emisiones de CO <sub>2</sub> , diferentes configuraciones de microrred, microrred en modo isla u conectada a red.	[21]
Técnico-económica	No	No	No	Costo del ciclo de vida para la batería.	[50]–[54]
Técnico-económica	Sí	No	No	Degradación de la batería. Intercambio de energía con la red.	[55]
Técnico-económica	No	No	No	Parámetros técnico-económicos ajustados en HOMER.	[56]–[60]
Técnico-económica	No	No	Sí	Condiciones climáticas adversas.	[61]
Técnico-económica	No	No	Sí	Despacho de energía. Degradación de la batería.	[62]
Técnico-económica	No	No	No	Enfoque probabilístico en parámetros como la demanda y fuentes de energía.	[63]–[66]
Técnico-económica	No	No	No	Enfoque estocástico en parámetros como la demanda y fuentes de energía.	[67]–[71]

disposición del mercado actual para el reciclaje de baterías. El mercado para el reciclaje de baterías se encuentra liderado por Europa, donde se ha generado toda una cultura de reciclaje. En segundo puesto se encuentra el mercado de Norte América y, en tercer lugar, se encuentra el mercado de Asia pacífico.

## 6. Discusión

La revisión realizada en este artículo indica que los criterios de selección del tipo de batería que se utiliza en el sistema de almacenamiento de la microrred eléctrica se pueden clasificar en dos grupos, criterios técnicos y criterios técnico-económicos. Los criterios técnicos solo consideran los parámetros técnicos que aseguran que el diseño técnicamente los requisitos establecidos en un contexto en el que la microrred funcione en un escenario domiciliario. El hecho de solo considerar parámetros técnicos para la selección del tipo de batería del sistema de almacenamiento no resulta suficiente, puesto que esto puede conducir a la selección de una tecnología de batería cuyos costos hagan que el proyecto completo no sea viable económicamente. Esto resulta más crítico en los casos en los cuales la implementación de la microrred está orientada a poblaciones de escasos recursos en zonas aisladas, donde el presupuesto inicial debe ser considerado a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto.

La selección del tipo de batería con criterios del tipo técnico-económico considera un factor que se relaciona de forma directa con el ciclo de vida del proyecto y la vida útil de la batería. De esta forma, es posible realizar una selección de la tecnología de batería que asegure, junto a los demás elementos de la microrred, la viabilidad económica y técnica del proyecto que dé pie a la implementación a nivel domiciliario de las microrredes.

Es importante resaltar que dentro de las limitaciones del enfoque técnico-económico se encuentra una complejidad relacionada con el número de variables que considera el análisis y la búsqueda del modelo. Sobre esta base, la experimentación y prueba de baterías de diferente tecnología ha conducido a resultados y precios que son muy variados. Por ello, los criterios de selección de baterías entre una microrred y otra pueden variar. Así, para estos procesos se pueden tener, entre otras, las siguientes consideraciones:

- Tecnología y especificaciones frente al precio.
- Costos de operación y de mantenimiento.
- Vida útil versus profundidad de descarga.

Si se examina el caso de una microrred domiciliaria orientada a cubrir necesidades de energía ( $\geq 1$  hora) en vez de alta potencia ( $\leq 1$  hora), y se toma como criterio de selección obtener bajo precio a mediano y largo plazo del kilovatio-hora de almacenamiento. De acuerdo con lo anterior, se seleccionan baterías de carga y descarga lenta que son más durables que las fabricadas para descarga rápida. Además, por seguridad de la vivienda, se seleccionan baterías que sean selladas, libres de mantenimiento y sin costos de operación.

Por otra parte, considerando tecnologías y precios, actualmente se destacan las baterías de plomo ácido por menor precio y madurez en la tecnología. También se destacan, por las ventajas tecnológicas, las baterías de ion-litio que, siendo más costosas, aumentan en mercado y fabricación. Sin embargo, aún tienen precios que superan a las de plomo ácido.

Otro aspecto importante en la selección y dimensionamiento es la cantidad de energía a almacenar y la profundidad de descarga. Por ejemplo, se fabrican baterías de plomo ácido con vida útil

de 1000 ciclos para profundidad de descarga del 100 %. Las mismas baterías alcanzan vida útil de 20.000 ciclos con profundidad de descarga del 50 %, es decir, si se invierte el doble en baterías se alarga la vida útil 20 veces y se logra disminución de 10 veces en el valor del kWh a largo plazo. Por ejemplo, si se quieren almacenar y utilizar 3 kWh en la microrred, se escogen baterías con capacidad de 6 kWh que facilitan descargas de 1 kW durante tres horas y profundidad de descarga del 50 %. En este caso, se tiene un resultado adecuado con baterías de plomo ácido. Con baterías de 250 Ah, resulta el banco de una capacidad de 24 V/6 kWh.

Un enfoque técnico-económico que, además de las variables que en la literatura se pueden encontrar, considere el impacto del BMS (sistema de administración de la batería, por sus siglas en inglés) y gestión de la demanda puede considerarse como un tema para trabajos futuros.

## 7. Conclusiones

La selección de la tecnología de batería para el sistema de almacenamiento de una microrred eléctrica se puede realizar desde un enfoque técnico o técnico-económico. El enfoque técnico asegura el cumplimiento de los parámetros técnicos que requiere el usuario final, la limitación de este enfoque es la no consideración de la operación de la microrred a lo largo de toda su vida útil. Por otro lado, la selección de la tecnología de batería bajo un enfoque técnico-económico sí considera la operación de la microrred a lo largo de toda su vida útil, las principales características de este enfoque son su complejidad y la consideración del impacto de otros factores como el sistema de administración de la batería.

## Referencias

- [1] A. J. Cavallo, "Energy storage technologies for utility scale intermittent renewable energy systems", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 123, n.º 4, pp. 387-389, 2001. <https://doi.org/10.1115/1.1409556> ↑ 285
- [2] J. A. Guacaneme, D. Velasco y C. L. Trujillo, "Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes", *Información Tecnológica*, vol. 25, n.º 2, 2014. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000200020> ↑ 285
- [3] D. Wenzhong, *Energy Storage for Sustainable Microgrid*. Cambridge: Academic Press, 2015. ↑ 285
- [4] P. Denholm, E. Ela, B. Kirby y M. Milligan, "The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation", informe técnico, National Renewable Energy Lab., 2010. ↑ 286, 287
- [5] H. M. Gao y C. Wang, "A detailed pumped storage station model for power system analysis", en *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, octubre 2006. ↑ 286
- [6] A. Daneshi, N. Sadromtazi, H. Daneshi y M. Khederzadeh, "Wind power integrated with compressed air energy storage", en *IEEE International Conference on Power and Energy*, Kuala Lumpur, diciembre 2010. ↑ 286
- [7] E. K. Hussain, D. Benchebra, K. Atallah, H. S. Ooi, M. Burke y A. Goodwin, "A flywheel energy storage system for an isolated microgrid", en *IET Conference Publications*, Naples, septiembre 2014. ↑ 286
- [8] B. R. Alamri y A. R. Alamri, "Technical review of energy storage technologies when integrated with intermittent renewable energy", en *1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Nanjing, abril 2009. ↑ 286
- [9] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, y Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, vol. 19, n.º 3, pp. 291-312, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014> ↑ 286, 288

- [10] N. Gholam-Abbas y P. Gianfranco, Eds., *Lithium Batteries: Science and Technology*. Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-92675-9> ↑287
- [11] K. Popper y A. Hove, “Energy storage world markets report”, informe técnico, *Energy Storage World*, 2017. ↑287
- [12] International Renewable Energy Agency, “Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook”, informe técnico, International Renewable Energy Agency, 2015. ↑287
- [13] R. Passey, T. Spooner, I. MacGill, M. Watt y K. Syngellakis, “The potential impacts of grid-connected distributed generation and how to address them: A review of technical and non-technical factors”, *Energy Policy*, vol. 39, n.º 10, pp. 6280-6290, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.027> ↑287
- [14] M. G. Ruíz, “Pasado, presente y futuro de vehículos eléctricos”, tesis de grado, *Universidad Tecnológica Pereira*, Pereira, 2015. ↑288
- [15] M. Kazmierkowski, “Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives (Emadi, A.; 2006) [Book News]”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, n.º 2, pp. 46-47, 2008. <https://doi.org/10.1109/MIE.2008.926483> ↑289
- [16] International Electrotechnical Commission, “Energy storage white paper”, informe técnico, International Electrotechnical Commission, 2009. ↑289, 290
- [17] D. Linden y T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*. McGraw Hill, 2002. ↑289
- [18] X. Luo, J. Wang, M. Dooner y J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”, *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511-536, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081> ↑289
- [19] J. Cho, S. Jeong y Y. Kim, “Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 48, pp. 84-101, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.01.002> ↑290
- [20] B. Nykvist y M. Nilsson, “Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles”, *Nature Clim Change*, vol. 5, n.º 4, pp. 329-332, 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2564> ↑291
- [21] S. Dhundhara, Y. P. Verma y A. Williams, “Techno-economic analysis of the lithium-ion and lead-acid battery in microgrid systems”, *Energy Conversion and Management*, vol. 177, pp. 122-142, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.030> ↑291, 293, 294, 297
- [22] W. M. Amutha y V. Rajini, “Cost benefit and technical analysis of rural electrification alternatives in southern India using HOMER”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 236-246, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.042> ↑291, 292
- [23] S. Singh, M. Singh y S. C. Kaushik, “Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system”, *Energy Conversion and Management*, vol. 128, pp. 178-190, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.046> ↑291, 292
- [24] M. Usman, M. T. Khan, A. S. Rana y S. Ali, “Techno-economic analysis of hybrid solar-diesel-grid connected power generation system”, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, n.º 3, pp. 653-662, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2017.06.002> ↑291, 292
- [25] A. Chauhan y R. P. Saini, “Techno-economic feasibility study on Integrated Renewable Energy System for an isolated community of India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 388-405, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.290> ↑291, 292
- [26] A. H. Mamaghani, S. A. A. Escandon, B. Najafi, A. Shirazi y F. Rinaldi, “Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia”, *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 293-305, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.086> ↑291, 292
- [27] L. M. Halabi, S. Mekhilef, L. Olatomiwa y J. Hazelton, “Performance analysis of hybrid PV/diesel/battery system using HOMER: A case study Sabah, Malaysia”, *Energy Conversion and Management*, vol. 144, pp. 322-339, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.070> ↑291, 292
- [28] R. Rajbongshi, D. Borgohain y S. Mahapatra, “Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER”, *Energy*, vol. 126, pp. 461-474, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.056> ↑291, 292
- [29] P. Peerapong y B. Limmeechokchai, “Optimal electricity development by increasing solar resources in diesel-based micro grid of island society in Thailand”, *Energy Reports*, vol. 3, pp. 1-13, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2016.11.001> ↑291, 292
- [30] Y. Sawle, S. C. Gupta y A. K. Bohre, “Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2217-2235, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.030>

- [//doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.033](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.033) ↑291, 292
- [31] B. Dursun, C. Gokcol, I. Umut, E. Ucar y S. Kocabey, “Techno-Economic Evaluation of a Hybrid PV-Wind Power Generation System”, *International Journal of Green Energy*, vol. 10, n.º 2, 2012. <https://doi.org/10.1080/15435075.2011.641192> ↑291, 292
- [32] A. Hiendro, R. Kurnianto, M. Rajagukguk, Y. M. Simanjuntak y Junaidi, “Techno-economic analysis of photovoltaic/wind hybrid system for onshore/remote area in Indonesia”, *Energy*, vol. 59, pp. 652-657, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.005> ↑291, 292
- [33] R. Kumar, R. A. Gupta y A. K. Bansal, “Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm”, *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 8, pp. 33-43, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2012.08.002> ↑291, 292
- [34] B. K. Das, N. Hoque, S. Mandal, T. K. Pal y M. A. Raihan, “A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh”, *Energy*, vol. 134, pp. 775-788, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.024> ↑291, 292
- [35] M. K. Shahzad, A. Zahid, T. Ur Rashid, M. A. Rehan, M. Ali y M. Ahmad, “Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software”, *Renewable Energy*, vol. 106, pp. 264-273, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.033> ↑291, 292
- [36] V. Tomar y G. N. Tiwari, “Techno-economic evaluation of grid connected PV system for households with feed in tariff and time of day tariff regulation in New Delhi – A sustainable approach”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 822-835, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.263> ↑291, 292
- [37] C. Phurailatpam, B. S. Rajpurohit y L. Wang, “Planning and optimization of autonomous DC microgrids for rural and urban applications in India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 194-204, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.022> ↑291, 292
- [38] S. Salehin, M. T. Ferdous, R. M. Chowdhury, S. S. Shithi, M. S. Bhuiyan y M. A. Mohammed, “Assessment of renewable energy systems combining techno-economic optimization with energy scenario analysis”, *Energy*, vol. 112, pp. 729-741, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.110> ↑291, 292
- [39] R. Sen y S. C. Bhattacharyya, “Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER”, *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 388-398, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.028> ↑291, 292
- [40] R. K. Chauhan y K. Chauhan, “Management of renewable energy source and battery bank for power losses optimization”, en Q. Yang, T. Yang y W. Li, Eds., *Smart Power Distribution Systems*. Academic Press, 2019, pp. 299-320, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812154-2.00015-8> ↑291, 292, 297
- [41] K. Chauhan y R. K. Chauhan, “Optimization of grid energy using demand and source side management for DC microgrid”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 9, n.º 3, p. 35101, 2017. <https://doi.org/10.1063/1.4984619> ↑291, 297
- [42] J. Liu et al., “Iron fumarate as large-capacity and long-life anode material for Li-ion battery boosted by conductive Fe<sub>2</sub>P decorating”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 809, p. 151826, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151826> ↑291, 297
- [43] X. Chen y M. Najafi, “Adsorbed Iron oxide (FeO), Lead oxide (PbO), Tellurium dioxide (TeO<sub>2</sub>) and Niobium dioxide (NbO<sub>2</sub>) to silicon nanotube (9, 0) as anode electrodes in Li- and Na-ion batteries”, *Solid State Ionics*, vol. 341, p. 115043, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115043> ↑291
- [44] R. K. Chauhan, K. Chauhan, B. R. Subrahmanyam, A. G. Singh y M. M. Garg, “Distributed and centralized autonomous DC microgrid for residential buildings: A case study”, *Journal of Building Engineering*, vol. 27, p. 100978, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100978> ↑292, 297
- [45] S. Wang, L. Lu, X. Han, M. Ouyang y X. Feng, “Virtual-battery based droop control and energy storage system size optimization of a DC microgrid for electric vehicle fast charging station”, *Applied Energy*, vol. 259, p. 114146, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114146> ↑292
- [46] R. K. Chauhan y K. Chauhan, “Battery Monitoring and Control System for Photovoltaic based DC Microgrid”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 20, n.º 6, 2019. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2019-0133> ↑293, 297
- [47] J. Ribič, J. Pihler, R. Maruša, F. Kokalj y P. Kitak, “Lead-Acid Battery Sizing for a DC Auxiliary System in a Substation by the Optimization Method”, *Energies*, vol. 12, n.º 22, p. 4400, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12224400> ↑293

- [48] E. Galvan, P. Mandal y Y. Sang, "Networked microgrids with roof-top solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 123, p. 106239, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106239> ↑293, 297
- [49] Q. Sun, D. Xing, H. Alafnan, X. Pei, M. Zhang y W. Yuan, "Design and test of a new two-stage control scheme for SMES-battery hybrid energy storage systems for microgrid applications", *Applied Energy*, vol. 253, p. 113529, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113529> ↑293, 297
- [50] Y. Tian, X. Li, Y. Zhu y R. Xia, "Optimal capacity allocation of multiple energy storage considering micro-grid cost Optimal capacity allocation of multiple energy storage considering microgrid cost", en *The International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering*, Hangzhou, mayo 2018. ↑294, 297
- [51] S. A. Pourmousavi, R. K. Sharma y B. Asghari, "A framework for real-time power management of a grid-tied microgrid to extend battery lifetime and reduce cost of energy", en *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Washintong, enero 2012. ↑294, 297
- [52] M. Jarnut, S. Wermiński y B. Wańkiewicz, "Comparative analysis of selected energy storage technologies for prosumer-owned microgrids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 925-937, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.084> ↑294, 297
- [53] I. Pawel, "The Cost of Storage – How to Calculate the Levelized Cost of Stored Energy (LCOE) and Applications to Renewable Energy Generation", *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 68-77, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.159> ↑294, 297
- [54] M. Obi, S. M. Jensen, J. B. Ferris y R. B. Bass, "Calculation of levelized costs of electricity for various electrical energy storage systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 908-920, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.043> ↑294, 297
- [55] H. Hosseinnia, J. Modarresi y D. Nazarpour, "Optimal eco-emission scheduling of distribution network operator and distributed generator owner under employing demand response program", *Energy*, vol. 191, p. 116553, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116553> ↑294, 297
- [56] J. Asfar, A. Atieh y R. Al-Mbaideen, "Techno-economic analysis of a microgrid hybrid renewable energy system in Jordan", *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 52, n.º 4, pp. 415-423, 2019. <https://doi.org/10.18280/jesa.520412> ↑295, 297
- [57] S. A. Sadat, J. Faraji, M. Babaei y A. Ketabi, "Techno-economic comparative study of hybrid microgrids in eight climate zones of Iran", *Energy Science and Engineering*, vol. 8, n.º 9, 2020. <https://doi.org/10.1002/ese3.720> ↑295, 297
- [58] A. S. Aziz, M. F. Naim, M. R. Adzman, M. F. Mohammed y M. A. M. Ramli, "Feasibility analysis of grid-connected and islanded operation of a solar PV microgrid system: A case study of Iraq", *Energy*, vol. 191, p. 116591, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116591> ↑295, 297
- [59] E. A. Al-Ammar et al., "Residential Community Load Management Based on Optimal Design of Standalone HRES With Model Predictive Control", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12542-12572, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965250> ↑295, 297
- [60] F. Dawood, G. M. Shafiullah y M. Anda, "Stand-Alone Microgrid with 100 % Renewable Energy: A Case Study with Hybrid Solar PV- Battery-Hydrogen", *Sustainability*, vol. 12, n.º 5, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12052047> ↑295, 297
- [61] M. R. Qitoras, P. E. Campana y C. Crawford, "Exploring electricity generation alternatives for Canadian Arctic communities using a multi-objective genetic algorithm approach", *Energy Conversion and Management*, vol. 210, p. 112471, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112471> ↑295, 297
- [62] T. S. Mahmoud, B. S. Ahmed y M. Y. Hassan, "The role of intelligent generation control algorithms in optimizing battery energy storage systems size in microgrids: A case study from Western Australia", *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 1335-1352, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112471> ↑296, 297
- [63] G. Carpinelli, F. Mottola y D. Proto, "Probabilistic sizing of battery energy storage when time-of-use pricing is applied", *Electric Power Systems Research*, vol. 141, pp. 73-83, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.07.013> ↑296, 297
- [64] S. Bahramirad, W. Reder y A. Khodaei, "Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, n.º 4, pp. 2056-2062, 2012. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2217991> ↑296, 297
- [65] H. Bludszuweit y J. A. Dominguez-Navarro, "A Probabilistic Method for Energy Storage Sizing Based on Wind Power Forecast Uncertainty", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, n.º 3, pp. 1651-1658, 2011. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2162202>

- [//doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2089541](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2089541) ↑296, 297
- [66] D. M. Greenwood, N. S. Wade, P. C. Taylor, P. Papadopoulos y N. Heyward, "A Probabilistic Method Combining Electrical Energy Storage and Real-Time Thermal Ratings to Defer Network Reinforcement", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, n.º 1, pp. 374-384, 2017. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2600320> ↑296, 297
- [67] S. X. Chen, H. B. Gooi y M. Q. Wang, "Sizing of Energy Storage for Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, n.º 1, pp. 142-151, 2012. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2160745> ↑296, 297
- [68] T. A. Nguyen, M. L. Crow, y A. C. Elmore, "Optimal Sizing of a Vanadium Redox Battery System for Microgrid Systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, n.º 3, pp. 729-737, 2015. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2404780> ↑296, 297
- [69] S. Sukumar, H. Mokhlis, S. Mekhilef, K. Naidu y M. Karimi, "Mix-mode energy management strategy and battery sizing for economic operation of grid-tied microgrid", *Energy*, vol. 118, pp. 1322-1333, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.018> ↑296, 297
- [70] J. P. Fossati, A. Galarza, A. Martín-Villate y L. Fontán, "A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids", *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 539-549, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.039> ↑296, 297
- [71] L. Guo, W. Liu, B. Jiao, B. Hong y C. Wang, "Multi-objective stochastic optimal planning method for stand-alone microgrid system", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 8, n.º 7, pp. 1263-1273, 2014. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0541> ↑296, 297
- [72] M. Sufyan, N. A. Rahim, M. M. Aman, C. K. Tan y S. R. S. Raihan, "Sizing and applications of battery energy storage technologies in smart grid system: A review", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, n.º 1, p. 14105, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5063866> ↑296

### R. A. Peña Suesca



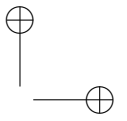
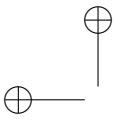
He received his B.S. degree in Electronics Engineering from the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 1976, the M.Sc. degree in Electrical Engineering from the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, in 2006, currently he is studying a PhD. in Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. He currently works as a professor in the Department of Electrical Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, where he teaches courses on analogue circuits and power electronics. His main research interests include power electronics and microgrids.  
e-mail: rapena@udistrital.edu.co

### A. I. Santos León



Received the B.S. degree in Electric Engineering from the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2016, currently he is studying a M.Sc. in Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. He is a co-researcher at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in the research lines of Li-ion batteries and DC microgrids. His main research interests include: Li-ion batteries and DC microgrids.  
e-mail: andresisantosleon@gmail.com

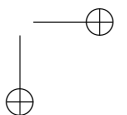
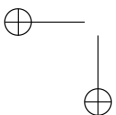


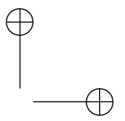
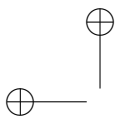


### **C. L. Trujillo Rodríguez**



He received his B.S. degree in Electronics Engineering from the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2003, the M.Sc. degree in Electrical Engineering from the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, in 2006, and the Ph.D. degree in Electronics Engineering from the Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, in 2011. He currently works as a professor in the Department of Electrical Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, where he teaches courses on analogue circuits and power electronics. His main research interests include modelling and control of power converters applied to the distributed generation and microgrids.  
e-mail: cltrujillo@udistrital.edu.co





Case-study

## Comparative Study of a Regenerative Braking System and Regeneration with Constant Kinetic Energy in Battery-based Electric Vehicles

*Estudio comparativo de un sistema de freno regenerativo y regeneración con energía cinética constante en vehículos eléctricos de batería*

**Cristian Camilo Monroy<sup>1</sup>, Cristian Alejandro Siachoque<sup>1</sup>, Iván Camilo Durán-Tovar<sup>ID</sup>\*,<sup>2</sup>, Agustín Rafael Marulanda Guerra<sup>ID</sup><sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá-Colombia), <sup>2</sup>Grupo de Modelación Estratégica en Energía y Potencia, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá-Colombia)

\*Correspondence email: [ivan.duran@escuelaing.edu.co](mailto:ivan.duran@escuelaing.edu.co)

Received: 30-04-2020. Modified: 06-08-2020. Accepted: 18-08-2020

### Abstract

**Context:** The constant increase in the use of electric vehicles worldwide has motivated research to improve their autonomy compared to traditional combustion vehicles. This article presents the study of a battery charging system for electric vehicles based on the constant movement of the traction system.

**Method:** An evaluation is carried out on a constant kinetic energy regeneration system to increase the autonomy of electric vehicles. This is achieved through the validation of a mathematical energy consumption model of a battery-based electric vehicle with a regenerative brake system, comparing the results of consumption and load states between the two energy recovery systems by means of simulations.

**Results:** The vehicle with constant motion regeneration system consumed 42,9% more power than the one using a regenerative brake because the new system increased the total mass in the vehicle. This increase in mass means that more power must be consumed by the traction system to move the vehicle.

**Conclusions:** The conventional regenerative brake system is more favorable with respect to the proposed regeneration system for kinetic energy, except in constant speed and zero acceleration sections.

**Keywords:** Efficiency, electric vehicle, kinetic energy, regenerative brake, state of charge.

**Language:** Spanish.

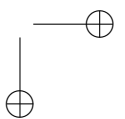
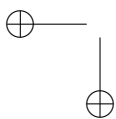
Open access



Cite this paper as: C.C. Monroy, C.A. Siachoque, I.C. Durán-Tovar, A.R. Marulanda-Guerra: "Comparative Study of Regenerative Braking System and Regeneration with Constant Kinetic Energy in Battery-based Electric Vehicles", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 305-322 (2020).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.16620>



### Resumen

**Contexto:** El incremento constante en el uso de vehículos eléctricos a nivel mundial ha motivado investigaciones para mejorar la autonomía de los mismos frente vehículos de combustión tradicionales. Este artículo presenta el estudio de un sistema de carga de batería para vehículos eléctricos basado en el movimiento constante del sistema de tracción.

**Método:** Se realiza una evaluación sobre un sistema de regeneración de energía cinética constante para aumentar la autonomía de vehículos eléctricos. Esto se logra mediante la validación de un modelo matemático de consumo de energía de un vehículo eléctrico de batería con sistema de freno regenerativo, comparando mediante simulaciones los estados de consumo y carga entre los dos sistemas de recuperación de energía.

**Resultados:** El vehículo con un sistema de regeneración por movimiento constante consumió 42,9 % más de potencia que utilizando freno regenerativo, debido a que el nuevo sistema aumentó la masa total en el vehículo. Dicho aumento de masa, hace que se deba consumir mayor potencia por parte del sistema de tracción para mover el vehículo.

**Conclusiones:** El sistema convencional de freno regenerativo resulta más favorable respecto al sistema de regeneración por energía cinética propuesto, excepto en tramos de velocidad constante y aceleración cero.

**Palabras clave:** Eficiencia, energía cinética, estado de carga, frenado regenerativo, vehículo eléctrico.

**Lenguaje:** Español.

## 1. Introducción

En los últimos años, la movilidad eléctrica se ha convertido en un área de interés tanto para la industria automotor como para la investigación. La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), en su informe Global EV Outlook 2019 [1], señala que durante el año 2018, el parque de vehículos eléctricos (EVs) a nivel mundial, sin considerar transporte público, llegó a 5,1 millones de unidades, un aumento del 63 % respecto al año 2017. Este porcentaje es similar a la tasa de crecimiento interanual del 57 % obtenido en 2017 y del 60 % en 2016. De acuerdo con la IEA, los vehículos eléctricos puros representan el 64 % de la flota mundial de automóviles eléctricos. Durante el año 2018, el 45 % de la flota mundial de vehículos eléctricos se encontraban en la República Popular de China, el 24 % en Europa, el 22 % en los Estados Unidos. El resto de los países representa alrededor del 9 % de los vehículos eléctricos.

Estos vehículos se clasifican principalmente en cuatro categorías [2]. El primero es el vehículo eléctrico de baterías (BEV, por sus siglas en inglés), el cual se caracteriza por emplear únicamente motor eléctrico para tracción mecánica. Está alimentado por un banco de baterías recargables, y su autonomía depende de la capacidad de las baterías instaladas; pueden dar autonomías de 100 km, en modelos económicos, y hasta 600 km en los modelos de alta gama. En segundo lugar, se tiene al vehículo eléctrico híbrido (HEV, por sus siglas en inglés), el cual mezcla la motorización con motores de dos tecnologías, uno de combustión interna y otro eléctrico. La forma de operación de ambos motores depende de la configuración del vehículo (serie, paralelo y serie-paralelo); sin embargo, el motor de combustión interna opera principalmente como método de carga de baterías [3], [4], mientras que el motor eléctrico se encarga de la tracción mecánica. En tercer lugar,

se tiene al vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV, por sus siglas en inglés), el cual es similar al HEV, con un sistema de baterías de mayor capacidad, estas se cargan mediante conexión a la red y frenado regenerativo. Finalmente, se tiene el vehículo eléctrico con celdas de combustible (FCEV, por sus siglas en inglés), el cual es un vehículo eléctrico que tiene como principal fuente de energía, celdas de combustible de hidrógeno a alta presión. La gran diferencia de este último vehículo respecto a los anteriores, es la alta velocidad de recarga de las celdas, las cuales en ocasiones son comparables con la carga de gasolina en vehículos de combustión interna [5]- [8].

Todo este panorama ha motivado diferentes avances tecnológicos en cuanto a los sistemas de propulsión y sistemas de baterías, sus materiales y posibles configuraciones en los equipos para lograr, desde la perspectiva técnica, una mejora en la entrega de potencia y la autonomía del vehículo [9].

La autonomía es considerada una parte crítica en cualquier vehículo. Es la distancia máxima que este puede lograr con una sola recarga, por lo cual es un parámetro de mucha importancia a la hora de escoger el tipo de vehículo a comprar. Ahora, esta autonomía normalmente se ve afectada por las características del recorrido y especificaciones del EV, lo que ha hecho indispensable el desarrollo de sistemas que permitan recarga de las baterías con el auto en movimiento, sin depender de puntos de recarga en las vías [10].

Los vehículos eléctricos actuales emplean el freno regenerativo (FR), el cual es un sistema de recuperación de energía cinética que permite a partir de la acción de frenado, transformar parte de su energía cinética en energía eléctrica. Dicha energía eléctrica es almacenada en bancos de baterías o capacitores para su uso posterior [11]. Sin embargo, además de los sistemas de freno regenerativo, también ha existido otro sistema para la carga de baterías durante el movimiento. Este sistema es el alternador, el cual es una máquina eléctrica capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica, generando una corriente alterna mediante inducción electromagnética, y que es utilizado en vehículos convencionales de combustión interna y los vehículos híbridos para la carga de baterías en momentos de aceleración o desaceleración [11]. Como se explicó previamente, los HEV emplean este sistema para aumentar la autonomía del vehículo recargando las baterías.

Por otra parte, en la literatura especializada se reportan diferentes investigaciones en el área de regeneración de energía para vehículos eléctricos entre las que se encuentran el aprovechamiento de la energía potencial que puede ser recuperada incluyendo sistemas de almacenamiento de energía como baterías o supercapacitores [12]- [16]. Sin embargo, no existen referencias donde se reporten aplicaciones de alternadores en BEVs como sistema de regeneración independiente de la energía potencial que sea posible recuperar. Esto motiva a presentar un nuevo modelo de regeneración de energía cinética, el cual es comparado con el sistema de frenado regenerativo para una posible implementación en conjunto con este último sistema.

## 2. Modelos de sistemas de regeneración de energía en BEV

Para el planteamiento de un modelo de regeneración de energía basado en movimiento constante se deben tener en cuenta los modos de regeneración existentes y cuáles operan actualmente en los BEV. Dichos modelos se describen a continuación.

## 2.1. Freno regenerativo (FR)

En la actualidad, los modelos de los sistemas de regeneración de energía en los vehículos eléctricos están enfocados al empleo del FR [11]. Este sistema convierte la energía cinética del motor durante el proceso de frenado en energía eléctrica. La energía eléctrica convertida por el FR es normalmente utilizada para cargar una batería, empleando el mismo principio del alternador.

El funcionamiento del FR consiste en la utilización del motor para reducir la velocidad del automóvil al aplicar fuerza al pedal del freno. En este instante, el motor eléctrico funciona en dirección inversa, lo que reduce la velocidad del automóvil. Cuando el motor cambia de sentido de giro, empieza a actuar como generador, (Figura 1a) produciendo energía que puede emplearse en sistemas eléctricos, como la recarga de batería. Por el contrario, cuando el BEV está en condiciones de aceleración el motor gira en el otro sentido tomando energía de la batería, tal como se ilustra en la (Figura 1b).

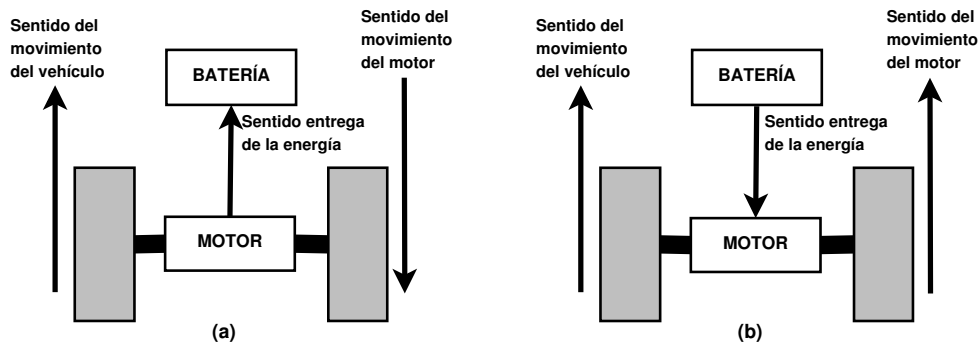


Figura 1. Diagrama de flujo de potencia en el BEV

## 2.2. Modelo de consumo de potencia de BEV con FR

El modelamiento de consumo de energía de un BEV consta de una serie de variables como lo son: potencia en la rueda, peso, aceleración, resistencia aerodinámica, resistencia a la rodadura, densidad del aire que depende de la humedad y temperatura del ambiente que golpea el frente del BEV, eficiencia de la transmisión y eficiencia del motor eléctrico. Este modelamiento se lleva a cabo a partir de un análisis de la potencia en la rueda a través de los diferentes elementos del ciclo de potencia, hasta llegar a la potencia que entrega la batería, la cual es mayor debido a las eficiencias de los equipos como inversores y cajas de transmisión.

La Figura 2 muestra el sentido de análisis del flujo de potencia, donde la potencia auxiliar corresponde al valor de la energía consumida por los diferentes elementos adicionales del vehículo como: aire acondicionado, iluminación exterior e interior, computadora a bordo, etc. La potencia en las llantas [17] hace referencia a la potencia instantánea que requiere el vehículo para moverse a determinada velocidad, esta potencia se rige por la ecuación (1).

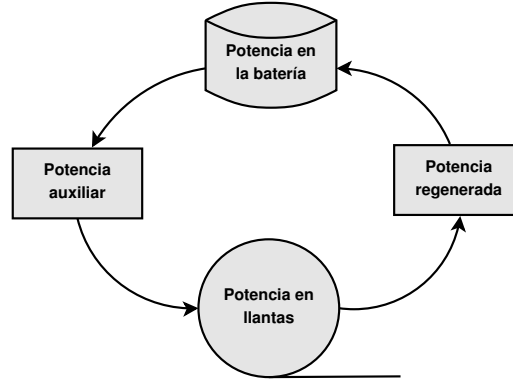


Figura 2. Diagrama de flujo de potencia en el BEV

$$P_{wheels} = [m \times a(t) + m \times g \times \cos \theta \times \frac{C_r}{1000} (C_1 \times v(t) + C_2) + \frac{\pi}{2} \times \rho_{air} \times A_f \times V^2(t) + m \times g \times \sin \theta] \times v(t) \quad (1)$$

Donde  $m$  es la masa del vehículo,  $a(t)$  es la aceleración del vehículo,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\theta$  es la inclinación de la vía,  $c_1$  es un parámetro adimensional que depende de las condiciones o estado de la vía,  $c_2$  es un parámetro adimensional que depende del tipo de neumático del vehículo,  $C_r$  es un parámetro adimensional que depende del tipo de superficie de la vía,  $v(t)$  es la velocidad del vehículo,  $\rho_{air}$  es la densidad del aire,  $A_f$  es el área frontal de contacto con el aire del vehículo y  $C_D$  es el coeficiente aerodinámico del vehículo.

A partir de la potencia que necesitan las llantas para iniciar el movimiento, se determina la potencia eléctrica suministrada por la batería (ecuación 2), la cual contempla variables como eficiencia de transmisión  $\eta_{trans}$ , la eficiencia de la batería  $\eta_{ba}$  y la eficiencia de motor  $\eta_{motor}$ . Cuando la aceleración es positiva, el suministro de potencia va desde la batería hacia las ruedas, y cuando la aceleración es negativa el flujo de potencia es desde las ruedas hacia la batería ello debido al FR.

$$P_{elect} = \int_0^t \frac{P_{wheels}(t)dt}{\eta_{trans} \times \eta_{ba} \times \eta_{motor}} \quad (2)$$

En [10], se plantea la ecuación (3) de eficiencia del freno regenerativo  $\eta_{rb}$ , la cual se aplica para todo valor de aceleración  $a(t)$  negativa o frenado en el vehículo. Esta ecuación ha sido validada con datos suministrados para el Chevy Volt, donde se emplea el procedimiento federal de prueba (FTP, por sus siglas en inglés) del ciclo de conducción de la ciudad de la Agencia de Protección Ambiental para calificar el rango eléctrico total (AER, por sus siglas en inglés) del Volt con una desaceleración regenerativa máxima de 0,315 g y una eficiencia del sistema de frenado regenerativo de menos del 75 %.

$$\eta_{rb}(t) = \left[ e^{\left( \frac{0,0411}{a(t)} \right)} \right]^{-1} \quad (3)$$

La potencia del freno regenerativo (ecuación 4), es producto de la potencia de las llantas, la eficiencia del freno regenerativo y las eficiencias del sistema de transmisión y las baterías.

$$P_{regen}(t) = P_{wheels}(t) \times \eta_{rb}(t) \times \eta_{trans} \times \eta_{ba} \quad (4)$$

Con las ecuaciones anteriores, se construye el ciclo de potencia representado en la Figura 2, obteniendo así la potencia en la batería del BEV con la ecuación (5).

$$P_{bat}(t) = P_{elect} + P_{regen} + P_{wheels}(t) \quad (5)$$

### 2.3. Modelo de SoC de BEV con freno regenerativo

El estado de carga (SoC, por sus siglas en inglés), corresponde al porcentaje de la capacidad de almacenamiento nominal de la batería, indicador principal para calcular la autonomía restante en los BEVs. Este indicador depende directamente de la potencia entregada al motor eléctrico y los sistemas auxiliares. Dicha potencia, que se toma como un valor positivo, hace que disminuya el valor de potencia en la batería durante la regeneración de energía del BEV, dado a que la potencia regenerada por los diferentes sistemas se toma como potencia negativa. El estado de carga final, (ecuación (6)) se obtiene como la diferencia entre el estado de carga inicial  $SoC_0$ , tomado como el 95 %, y la sumatoria de todos los  $\Delta SoC_i(t)$  que se obtienen en cada instante de tiempo. Este cambio es la diferencia en el SoC anterior y el consumo de potencia eléctrica  $P_{elec(i)}(t)$  inmediato respecto a la capacidad de la batería, (ecuación (7)).

$$SoC_{final} = SoC_0 - \sum_{t=0}^N \Delta SoC_i(t) \quad (6)$$

$$\Delta SoC_i(t) = \Delta SoC_{i-1}(t) - \frac{P_{elec(i)}(t)}{3600 \times cap_{bateria}} \quad (7)$$

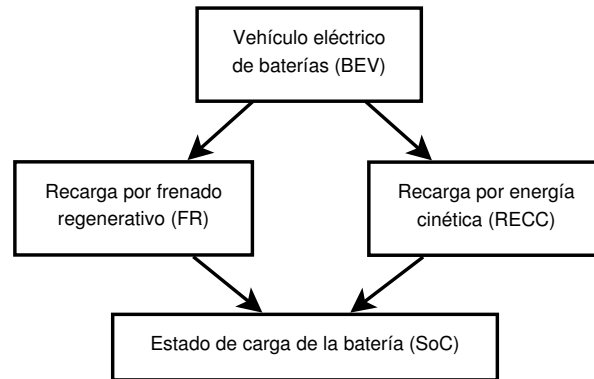
La ecuación de consumo de energía (ecuación (8)), dado en kWh/km, es el indicador más relevante para la comparación de sistemas de regeneración de energía, se obtiene al integrar la potencia que suministró la batería durante un recorrido respecto al tiempo y, dividido en los kilómetros del recorrido.

$$EC = \frac{1}{3600 \times d} \int_0^t P_{bat}(dt) \quad (8)$$

Con la ecuación (8), se realizará la comparación entre el FR y el sistema de recuperación de energía por energía cinética, para determinar cuál sistema de regeneración de energía logra tener el consumo más bajo.

## 3. Metodología de recuperación de energía en BEVs con energía cinética

La metodología propone el reemplazo del freno regenerativo en los modelos presentados en la sección anterior, por un sistema de alternador que aproveche la energía mecánica del vehículo en velocidad constante para la carga de una batería secundaria para ser utilizada como alimentación



**Figura 3.** Metodología de comparación de sistemas de regeneración en BEV

del sistema de tracción o motorización principal. La carga de la batería será monitoreada por medio del SoC en cada sistema, como se observa en la Figura 3.

Esta metodología busca comparar un BEV con FR con uno acondicionado a un sistema de regeneración de energía cinética constante (RECC), para así poder encontrar las condiciones que puedan ser favorables para el sistema RECC.

### 3.1. Modelo de recuperación de energía cinética constante

El sentido de flujo de potencia de la batería es único dependiendo de si se está entregando potencia al sistema motriz del BEV (potencia positiva), o recibiendo por un sistema de recarga o regeneración (potencia negativa). Por esta razón, no es posible que la batería entregue energía al sistema motriz al tiempo que se esté recargando por el sistema RECC. Debido a esto, se opta por la ubicación de una batería secundaria (BS), la cual será la encargada de almacenar toda la energía recuperada por el movimiento del BEV. Por tal razón, se toman a consideración tres casos diferentes donde el sistema aprovecha la regeneración de energía, es decir, tres casos diferentes donde la batería principal (BP) del sistema común de tracción del vehículo podrá aprovechar la energía almacenada de la BS o trabajar en conjunto.

#### 3.1.1. Primer caso, paralelo a la entrega de potencia del sistema de FR

Debe darse una aceleración negativa (freno) suficiente para que haya un flujo de potencia negativo hacia la BP debido a la energía adquirida por los frenos regenerativos y, paralelo a ese flujo de potencia, adicionar la energía almacenada por la BS. Este caso puede ser considerado no eficiente para el sistema RECC debido a que él puede regenerar energía, aun cuando el vehículo está en desaceleración y ocasionaría un desaprovechamiento del movimiento que lleva.

#### 3.1.2. Segundo caso, Energía cinética igual a cero ( $E_k = 0$ )

Corresponde a los momentos en los que el vehículo tiene una velocidad igual a cero ( $v(t) = 0$ ), es decir, no existe un flujo de potencia de la BP hacia el motor y la BS tampoco tiene un flujo de



potencia desde los generadores, momento preciso para una transferencia de energía eléctrica de la BS a la BP, aumentando la autonomía del vehículo sin estar conectado a un punto de carga o sometido a una regeneración de los frenos. Caso práctico en la espera de un semáforo o estacionamiento sin punto de carga de EV, pero con desventaja de una situación de un recorrido donde no incluye paradas momentáneas, desaprovechando la energía almacenada de la BS y más si se encuentra en su SoC del 100 %.

### 3.1.3. Tercer caso, Intercambio de banco de baterías

El sistema RECC es aprovechado en todo momento cuando el vehículo tiene movimiento debido a que almacena energía en la BS. Este es un caso de intercambio de batería de motorización dependiendo del SoC, como se observa en la Figura 4.

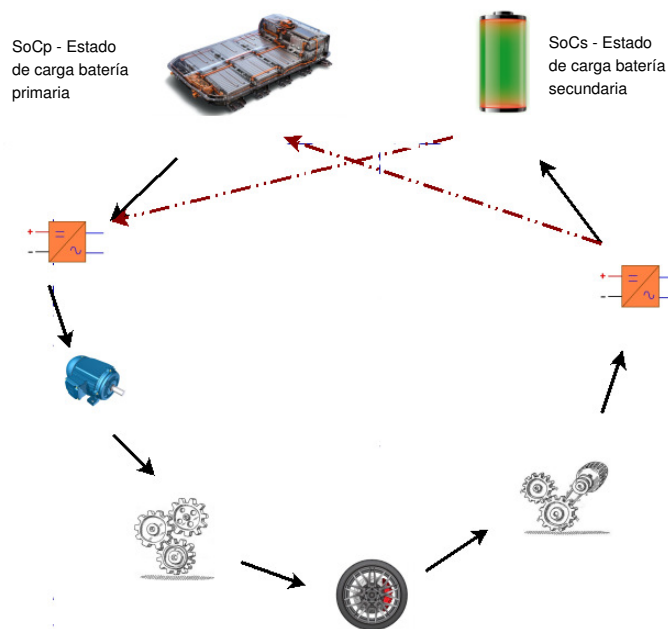


Figura 4. Ciclo de entrega de potencia según condiciones del  $SoC_p$  y  $SoC_s$

El cambio entre baterías se da de la siguiente manera:

- SoC 100 % de la BS: Si el banco de baterías secundario se encuentra en su totalidad cargado, sería eficiente para el uso de la energía almacenada, hacer un cambio de posición entre la BP y la BS, dejando a la batería principal encargada de almacenar la energía del sistema RECC hasta que la batería secundaria llegue al 10 % del SoC durante su uso.
- SoC 10 % de la BP: Presentada la situación de que la batería principal del BEV llegue a un nivel muy bajo, se hace el intercambio con la batería secundaria, al igual que en la situación

anterior precisamente la BS se encargaría de aumentar la autonomía del vehículo gracias a la energía almacenada con anterioridad.

Para este trabajo se opta por el tercer caso para el modelamiento del sistema de regeneración de energía cinética constante en el BEV, ya que corresponde al aprovechamiento y uso más eficiente de la recarga de energía para aumentar la autonomía del BEV en un recorrido.

### 3.2. Energía cinética constante recuperada

La energía que alimenta al sistema RECC proviene del movimiento constante del eje del motor, el cual está alimentado por la batería, como se observa en la Figura 4. Se puede inferir que en los momentos donde se deja de acelerar, es decir, en los que el BEV va a una velocidad constante, la energía se puede expresar como la inercia del BEV donde se mantiene la cantidad de momento que lleva, pero que se va reduciendo por la interacción del vehículo con el ambiente (fricción del aire, suelo, etc.).

Para conocer cuánta energía en forma de inercia se puede aprovechar en el sistema RECC, se requiere saber la potencia en las llantas para mover el vehículo y la potencia que consume el BEV. Para esto se plantea la ecuación (9).

$$w_{EV} = P_{eje} \times t + P_{wheels} \times t \quad (9)$$

Donde  $w_{EV}$  es la energía del BEV y  $P_{eje}$  es la energía instantánea del eje del sistema motriz del BEV aprovechable para el sistema RECC. Ahora, se calcula la potencia del eje ( $P_{eje}$ ) que puede ser aprovechada para el sistema RECC con la ecuación (10).

$$P_{eje} = \frac{w_{EV}}{t} - P_{wheels} \quad (10)$$

Por ecuaciones de energía cinética, la energía  $w_{BEV}$  puede expresarse de la siguiente manera (ecuación 11):

$$w_{EV} = \frac{1}{2}m(v(t))^2 = \frac{1}{2}I(\omega)^2 \quad (11)$$

$$I = \sum m_j r_j^2 \quad (12)$$

La sumatoria de (12) corresponde a  $I = mr^2$ , siendo  $m$  la masa del BEV y  $r$  el radio de la llanta y la velocidad angular  $\omega$  es igual a  $v(t)/r$ . Por lo tanto, la energía aprovechable para el sistema RECC en forma de inercia se puede expresar de manera simple con la ecuación de energía cinética de velocidad lineal  $v(t)$ . Finalmente, se tiene que:

$$P_{eje} = \frac{1}{2}m(v(t))^2 - P_{wheels} \quad (13)$$

La ecuación (13) describe cuál es la energía que sí es aprovechable cumpliendo con el balance energético, en los instantes de  $P_{elect} = 0$  y que será la potencia a la entrada del generador.

## 4. Caso de estudio

El caso de estudio aplicado para la comparación de los modelos del BEV con FR y con RECC, será un perfil de velocidad conocido como el *World Motorcycle Test Cycle* (WMTC) [18], [19]. Este perfil está referenciado en varios artículos como prueba de modelos [20] debido a que representa un recorrido tanto urbano como de carretera, es decir, tiene aceleraciones y desaceleraciones. Los parámetros básicos de dicho perfil se muestran en la Tabla I. El perfil de velocidad completo se muestra en la Figura 5, mientras que la Figura 6 presenta la sección de menor velocidad del perfil completo, la cual también será simulada.

Tabla I. Parámetros del perfil de velocidad WMTC

Nombre del perfil	Tiempo [seg]	Velocidad promedio [km/h]	Distancia recorrida [km]	Consumo de energía [Wh/km]
WMTC total	1978	57,88	28,91	226,59
WMTC bajo	600	24,42	4,07	234,59

Fuente: [21]

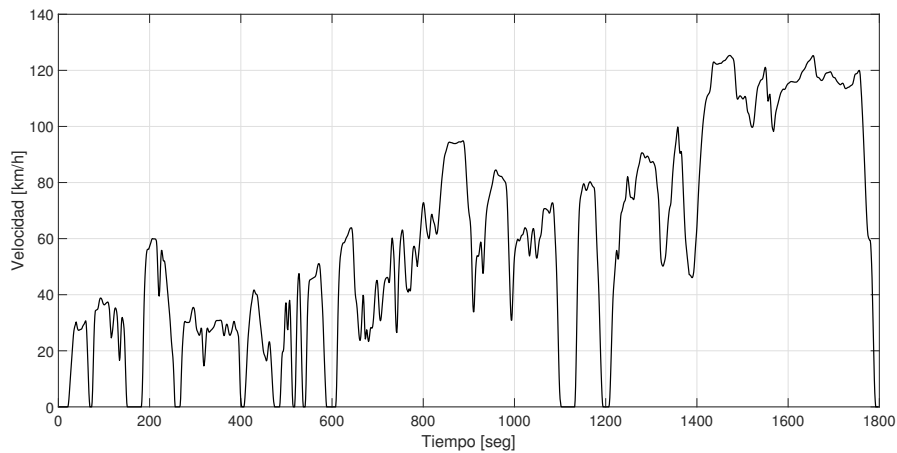


Figura 5. Perfil completo de velocidad WMTC [21]

Con los perfiles descritos anteriormente, consta de dos simulaciones, las cuales se realizan en un algoritmo implementado en el paquete matemático MATLAB para el modelo del vehículo eléctrico con FR y RECC. El diagrama de flujo del algoritmo se observa en la Figura 7.

El algoritmo toma los parámetros del vehículo y el perfil de velocidad para calcular la potencia en llantas. Se calcula la aceleración y potencia en el eje dependiendo de la velocidad. La potencia del eje define si el vehículo se encuentra realmente en movimiento. Cuando se tiene aceleración mayor o igual a cero, el algoritmo calcula la potencia entregada por la batería. Cuando presenta desace-

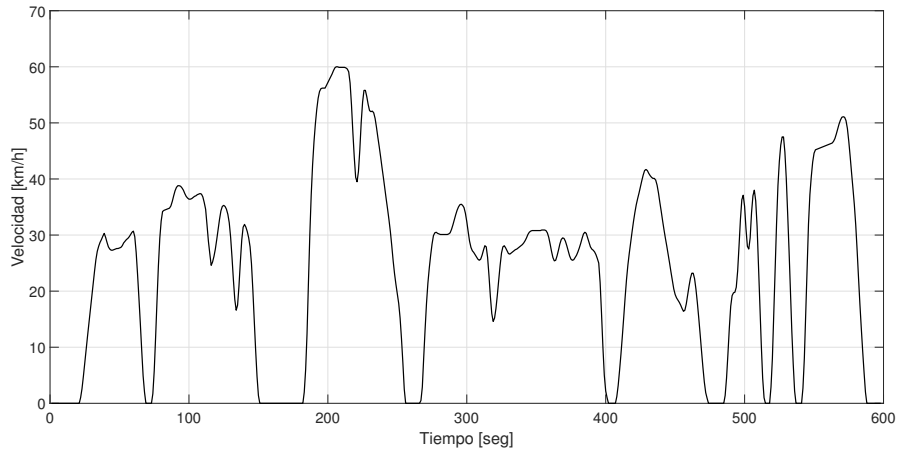


Figura 6. Perfil de velocidad WMTC de baja velocidad [21]

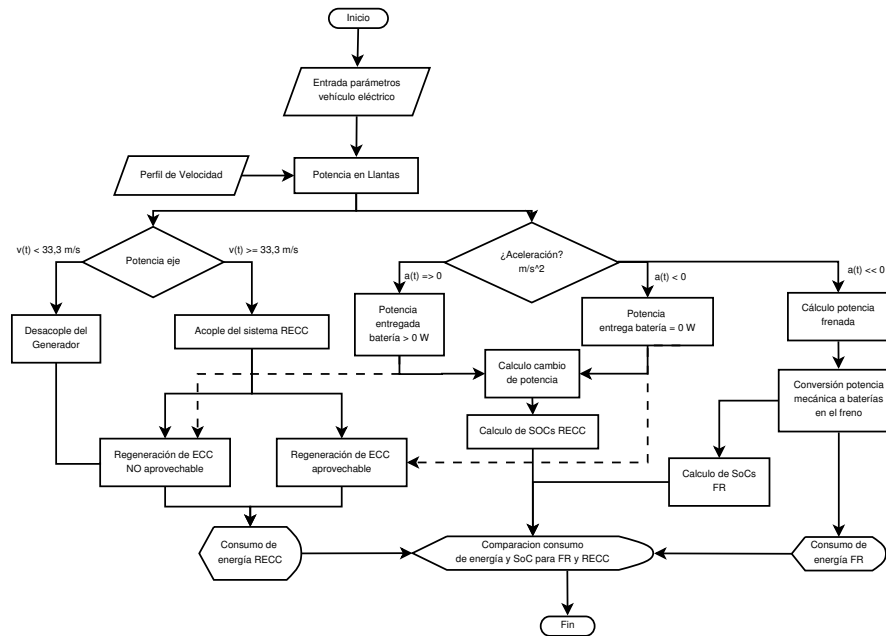
lización baja, el algoritmo calcula la energía regenerada y el SoC para el sistema RECC. Cuando el vehículo frena, es decir una desaceleración alta, el algoritmo calcula la energía regenerada y el SoC para sistema de FR. Una vez calculadas las potencias en cada sistema, se procede a obtener los resultados comparativos de energía de ambos sistemas.

Los parámetros aplicados en el modelo son de un BEV Nissan LEAF modelo 2015, alimentado por una batería de Ion-Litio, los cuales se presentan en la Tabla II [22].

Tabla II. Parámetros del perfil de velocidad WMTC

Parámetro	Valor
Masa del vehículo [kg]	1521
Aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]	9,8066
Inclinación de la vía [rad]	0
Tipo de compuesto de la rueda	4,575
Condición de la vía	0,0328
Densidad del aire [ $kg/m^3$ ]	1,2256
Área frontal de contacto con el aire [ $m^2$ ]	2,3316
Coefficiente aerodinámico del vehículo	0,28
Eficiencia de la transmisión	0,92
Eficiencia de la batería	0,90
Eficiencia del motor	0,91
Potencia auxiliar [W]	700
Radio de la llanta [m]	0,2578

Fuente: Characteristics Nissan leaf the car connection 2015 [22]



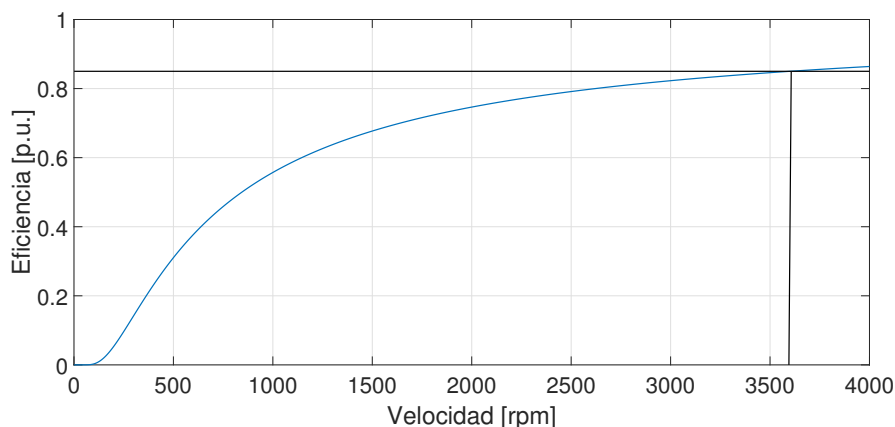
**Figura 7.** Diagrama de Flujo del algoritmo de cálculo del consumo de energía para el sistema RECC

Para la simulación comparativa se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se toma una velocidad nominal del generador estandarizada de 3600 rpm, dado que no se cuentan con datos experimentales de un generador apropiado para el sistema RECC.
- Se asume una eficiencia común de un generador. El valor asumido es de 85 % y será la eficiencia máxima de un generador, la cual depende de la velocidad mecánica aplicada en su eje.
- La ecuación (14) es la eficiencia  $\eta$  del generador será de comportamiento de curva inversa exponencial con argumento fraccionado en términos de la velocidad  $n$ , como se observa en la Figura 8.

$$\eta(t) = \left( \exp \left[ \frac{585}{n(t)} \right] \right)^{-1} \quad (14)$$

- Con una velocidad del generador de 3600 rpm y una máxima velocidad permitida en carretera en Colombia de 120 km/h, el valor de la relación de transformación de velocidad lineal es de  $r_1/r_2 = 2,78$ .
- El BEV debe aumentar su consumo de energía por unidad de distancia, debido a un peso agregado de varios elementos necesarios para un sistema de regeneración de energía, lo que implica un aumento de 1521 kg a 2000 kg para el Nissan Leaf 2015.



**Figura 8.** Curva teórica de la eficiencia del generador en función de la velocidad angular

Con el perfil WMTC se podrá visualizar el comportamiento del sistema de regeneración en recorridos de aceleración-desaceleración constante (urbano) y recorridos con altas velocidades (autopistas y similares).

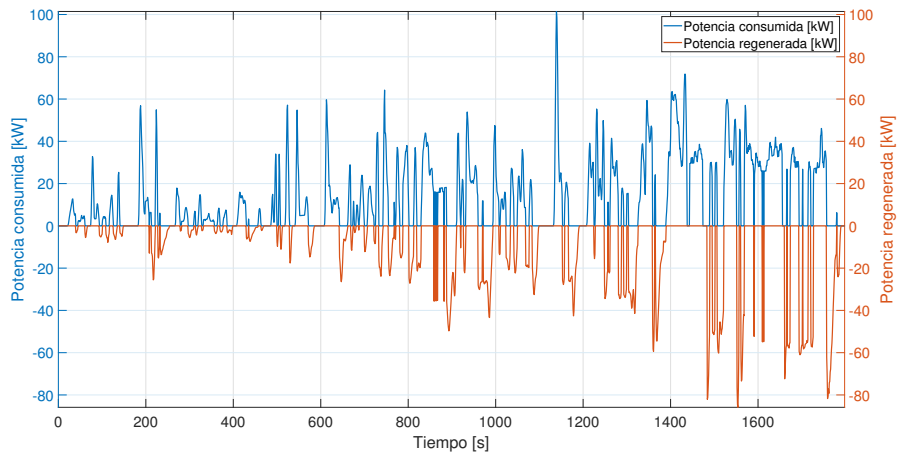
## 5. Resultados

El perfil de caso de estudio (WMTC) es simulado con el sistema de regeneración constante con los siguientes resultados. La Tabla III muestra los resultados comparativos entre los dos sistemas de regeneración en las simulaciones. Se puede observar que la energía consumida por el sistema RECC aumenta en 42,9 % respecto al sistema FR, debido a la masa adicional que ahora aparece en el vehículo eléctrico.

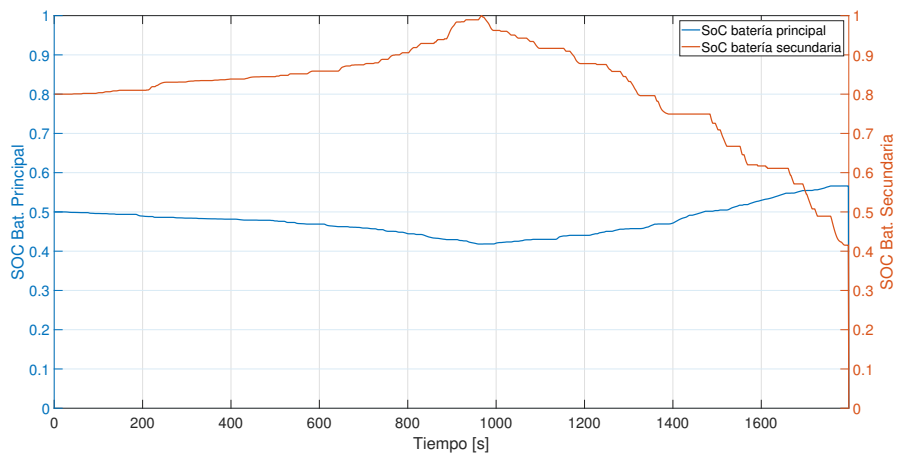
**Tabla III.** Resultados comparación entre FR y RECC

Sistema FR	Sistema RECC	Diferencia porcentual de consumo	Tiempo [seg]	Distancia [km]	Promedio velocidad [km/h]
158,62 [Wh/km]	226,59	42,9 %	1798	28,91	57,88

En la Figura 9, se puede apreciar la existencia de poca generación en la primera parte de la simulación, es decir, en la parte urbana del perfil WMTC. Sin embargo, la BS está incrementando su nivel de SoC, tal como se muestra en la Figura 10. Aproximadamente en 900 segundos, hay un incremento de la velocidad, por lo cual se evidencia aumento en la potencia generada. En este instante, el SoC de la BS llega a su valor máximo (100 %), realizando el respectivo intercambio para empezar a cargar la BP (Figura 10). En este instante, se aprecia un aumento progresivo en la generación. Con el aumento de la potencia regenerada desde el segundo 900 hasta el final del recorrido, también se observa aumento en la descarga de la BS. Hay que tener en cuenta que en estos resultados, las pérdidas eléctricas y mecánicas a la salida del generador están incluidas en la



**Figura 9.** Consumo de potencia con regeneración por energía cinética para el perfil WMTC completo



**Figura 10.** SoC del sistema de regeneración por energía cinética para el perfil WMTC completo

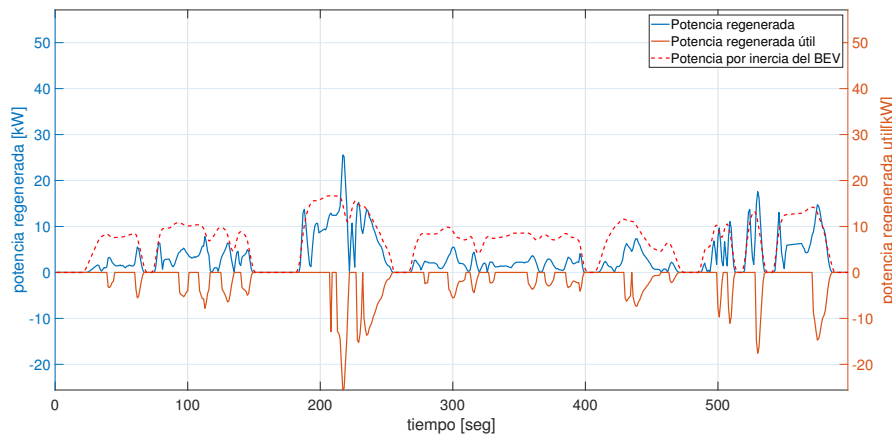
eficiencia máxima asumida para el mismo en el caso de estudio.

Debido a la necesidad de intercambio de baterías, se encuentra un aumento del consumo de energía del BEV con el sistema RECC, al igual que con un sistema de FR. Esto representa una poca viabilidad al sistema de generación propuesto en virtud de que el sistema de recuperación de energía busca, para un mismo perfil de velocidad, menores consumos de Wh/km, obligando a un dimensionamiento de baterías de menor capacidad para no sacrificar la autonomía del vehículo.

Los resultados de los valores máximos de la potencia entregada por la batería primaria son mayores a los encontrados en las simulaciones con el sistema FR. Esto se debe a que, cuando el BEV se encuentra acelerando, la energía entregada por la BP se debe suplir con la carga solicitada por el

BEV para su movimiento y también para hacer un intercambio de energía a la batería secundaria. Es decir, no es aprovechable la energía del BEV cuando el conductor está presionando el acelerador por que su ciclo va desde la batería de suministro de potencia al motor, pasando por los diferentes elementos de los sistemas con sus correspondientes eficiencias, hasta la batería de almacenamiento de potencia convertida del generador.

El análisis del balance energético observado en la Figura 11 muestra que solo es aprovechable la inercia del BEV debida al impulso del motor eléctrico, justo en momento que deja de acelerar, por conservación del *momentum*, donde trasforma una velocidad angular al eje del generador como energía útil para ser almacenada en la batería primaria o secundaria (según sea el caso del intercambio de las mismas).



**Figura 11.** Gráfica de potencia en batería primaria/secundaria con perfil de velocidad trasladado

## 6. Conclusiones

En este trabajo se presenta una comparación entre un sistema de regeneración por energía cinética constante con respecto a un sistema de freno regenerativo, donde los resultados obtenidos muestran poca viabilidad en la implementación del sistema de regeneración por energía cinética constante si el recorrido empleado no tiene momentos de aprovechamiento de la inercia en el vehículo.

Cuando el recorrido presenta largos tramos, es decir, distancias con pocos cambios de velocidad como se observa en el perfil WMTC total después de los 900 segundos, donde el vehículo se mueve por inercia adquirida por el impulso del motor eléctrico, el sistema RECC puede lograr la viabilidad en la implementación. En este punto, la Figura 9 mostró una potencia regenerada mayor a la potencia consumida.

Se encontró que el sistema de regeneración de energía cinética constante aumenta en 42,9 % en el consumo promedio de la energía en las baterías, debido a que el BEV tiene que recurrir a más



potencia de entrega de la batería debido al aumento de peso del vehículo por la batería secundaria y el propio sistema RECC.

Los análisis realizados en este trabajo se pueden extender a otros tipos de batería utilizados en vehículos eléctricos e incluir la electrónica de potencia para tomar en cuenta la eficiencia del sistema, además de incluir información más detallada sobre las especificaciones del sistema de regeneración propuesto.

## Referencias

- [1] International Energy Agency. "Global EV Outlook 2019". Technical report, International Energy Agency, 2019. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019> 306
- [2] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, and M. N. Mollah y E. Hossain. "A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development". *Energies*, vol. 10, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10081217> 306
- [3] E. Silvaş, T. Hofman, and M. Steinbuch. "Review of Optimal Design Strategies for Hybrid Electric Vehicles". *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45(30):57–64, 2012. <https://doi.org/10.3182/20121023-3-FR-4025.00054> 306
- [4] P. G. Anselma, A. Biswas, G. Belingardi, and A. Emadi. "Rapid assessment of the fuel economy capability of parallel and series-parallel hybrid electric vehicles". *Applied Energy*, vol. 275:1–11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115319> 306
- [5] M. F. M. Sabri, K.A. Danapalasingam, and M.F. Rahmat. "A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53(C):1433–1442, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.036> 307
- [6] A. M. Andwari, A. Pesiridis, R. Srihar, R. Martinez-Botas, and V. Eshfahanian. "A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78(C):414–430, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138> 307
- [7] A. Beltrán, J. Rumbo, H. Azcaray, K. Santiago, M. Calixto, and E. Sarmiento. "Simulación y control de la velocidad y par electromagnético de un motor de inducción trifásico: Un enfoque a vehículos eléctricos". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 16(3):308–320, 2019. <https://doi.org/10.4995/riai.2019.10452> 307
- [8] A. Cruz-Rojas, J. Rumbo-Morales, J. de la Cruz-Soto, J. Brizuela-Mendoza, F. Sorcia-Vázquez, and M. Martínez-García. "Simulation and Control of Reactants Supply and Regulation of Air Temperature in a PEM Fuel Cells System with Capacity of 50 kW". *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, vol. 18(1):349–360, 2019. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n1/Martinez> 307
- [9] A. F. Pacheco, M. E. S. Martins, and H. Zhao. "New European Drive Cycle (NEDC) simulation of a passenger car with a HCCI engine: Emissions and fuel consumption results". *Fuel*, vol. 111:733–739, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.060> 307
- [10] R. C. Redondo, M. Redondo, N. R. Melchor, F. R. Quintela, and J. M. García. "Carga de una batería y electricidad, dos términos de utilización confusa". *Técnica Industrial*, N/A(257):34–39, 2005. 307, 309
- [11] M. K. Yoong, Y. H. Gan, G. D. Gan, C. K. Leong, Z. Y. Phuan, B. K. Cheah, and K. W. Chew. "Studies of regenerative braking in electric vehicle. In *2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*", pages 40–45, 2010. <https://doi.org/10.1109/STUDENT.2010.5686984> 307, 308
- [12] W. Yu, R. Wang, and R. Zhou. "A Comparative Research on the Energy Recovery Potential of Different Vehicle Energy Regeneration Technologies". *Energy Procedia*, vol. 158:2543–2548, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.001> 307
- [13] N. L. Hinov, D. N. Penev, and G. I. Vacheva. "Ultra Capacitors Charging by Regenerative Braking in Electric Vehicles". *Proceedings 2016 XXV International Scientific Conference Electronics (ET)*, pages 1–4, 2016. <https://doi.org/10.1109/ET.2016.7753484> 307

- [14] J. Hamid, R. Sheeba, and S. Sofiya. “Energy Harvesting through Regenerative Braking using Hybrid Storage System in Electric Vehicles”. *Proceedings 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, pages 1–6, 2019. <https://doi.org/10.1109/INCOS45849.2019.8951323> 307
- [15] A. P. Budijono, I. N. Sutantra, and A. S. Pramono. “Development of Flywheel Regenerative Capture System to Improve Electric Vehicle Energy Captured System”. *Proceedings 2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, pages 845–850, 2019. <https://doi.org/10.1109/ICOIACT46704.2019.8938552> 307
- [16] S. Heydari, P. Fajri, R. Sabzehgar, and A. Asrari. “Optimal Blending of Regenerative and Friction Braking at Low Speeds for Maximizing Energy Extraction in Electric Vehicles”. *Proceedings 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pages 6815–6819, 2019. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8913117> 307
- [17] C. Fiori, K. Ahn, and H. A. Rakha. “Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation”. *Applied Energy*, vol. 168:257 – 268, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.097> 308
- [18] Organizacion Unece. “Worldwide harmonized Motorcycle Emissions Certification/Test procedure (WMTC) informalgroup”. Technical report, Organizacion Unece, 2011. <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grpe/wmtc.html> 314
- [19] U. N. E. Comission. “Draft global technical regulation”. Technical report, United Nations, 2003. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2003/wp29grpe/TRANS-WP29-GRPE-46-inf15e.pdf> 314
- [20] W. Saleh, R. Kumar, H. Kirby, and P. Kumar. “Real world driving cycle for motorcycles in Edinburgh”. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 14:326–333, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.03.003> 314
- [21] U. S. E. P. Agency. “Dynamometer drive schedules”. Technical report, EPA, 2017. <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules> 314, 315
- [22] The Car Connection. “Characteristics Nissan leaf the car connection 2015”. Technical report, The Car Connection, 2015. [https://www.thecarconnection.com/specifications/nissan\\_leaf\\_2015\\_base](https://www.thecarconnection.com/specifications/nissan_leaf_2015_base) 315

---

### Cristian Camilo Monroy Laverde

Nació en Bogotá, Colombia. Obtuvo su título como Ingeniero Electricista en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Sus áreas de interés son los sistemas de potencia, fuentes renovables y movilidad eléctrica. Email: cristian.monroy@mail.escuelaing.edu.co

---

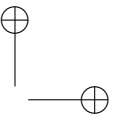
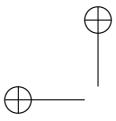
### Cristian Alejandro Siachoque Ardila

Nació en Bogotá, Colombia. Obtuvo su título como Ingeniero Electricista en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Sus áreas de interés son el instrumentación, generación eléctrica, gerencia de proyectos, movilidad eléctrica. Email: cristian.siachoque@mail.escuelaing.edu.co

---

### Iván Camilo Durán Tovar

Nació en Bogotá, Colombia. Obtuvo su título como Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería: Área Eléctrica en la Universidad de los Andes. Obtuvo su título de Doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. A partir de 2016, se vinculó como profesor de tiempo completo al programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Sus áreas de interés son sistemas de potencia, mercados de energía y gestión activos. Actualmente es director del grupo de Investigación de Modelación Estratégica en Energía y Potencia (MEEP) de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Email: ivan.duran@escuelaing.edu.co



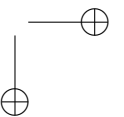
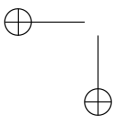
Estudio comparativo de un sistema de freno regenerativo y regeneración con energía cinética constante en...

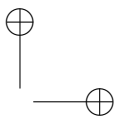
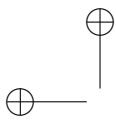
---

---

### **Agustín Rafael Marulanda Guerra**

Nació en Maracaibo (Zulia), Venezuela. Obtuvo su título como Ingeniero Electricista en la Universidad del Zulia y su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Sevilla. Desde el 2017 se vinculó como profesor asociado al programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Es miembro del Grupo de Investigación Modelación Estratégica en Energía y Potencia (MEEP) donde trabaja en áreas de optimización de sistemas de potencia, generación distribuida e integración de nuevas tecnologías a redes de distribución. Email: [agustin.marulanda@escuelaing.edu.co](mailto:agustin.marulanda@escuelaing.edu.co).





Research

REVISTA  
Ingeniería

## Mathematical Model for Centralized Supply Chains with Decisions Involving Shared Resources

*Modelo matemático para cadenas logísticas centralizadas con decisiones de recursos compartidos*

**Carlos Franco**<sup>ID\*,1</sup>, **Diana C. Guzmán-Cortés**<sup>ID<sup>2</sup></sup>, **Juan Carlos Figueroa-García**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad del Rosario, Bogotá-Colombia, <sup>2</sup>Universidad de la Sabana, Chía-Colombia, <sup>3</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia

\*Correspondence e-mail: carlosa.franco@urosario.edu.co

Recibido: 01/06/2020. Modificado: 31/08/2020. Aceptado: 15/09/2020.

### Abstract

**Context:** Cooperation in supply chain management is an important issue considering the global performance of the different echelons of a specific supply chain. In this sense, applying logistic strategies such as VMI (Vendor Managed Inventory) allows a system to manage distribution processes from a central point or depot. Additionally, the components of the chain work more closely with it, which allows increasing global performance, instead of individually developing each sector.

**Method:** A stochastic mathematical model is proposed which considers a network of customers, where products are delivered from a central depot. These customers can share part of their product with the central depot for redistribution, aiming to minimize shortage for other customers. A mathematical model is proposed which includes the elements involved in distribution processes. It is then reformulated to consider shortage and the linearization of some of its elements.

**Results:** Results show that implementing or adapting logistic strategies, such as managing from a central point and sharing resources along the supply chain, allows companies to reduce the complexity of some decisions and improve performance.

**Conclusions:** Implementing logistic strategies such as centralized management and sharing resources along a supply network allows companies to reduce the complexity of some decisions and, in turn, improve their performance.

**Keywords:** Centralized supply chains, optimization under uncertainty, sharing resources.

**Language:** English

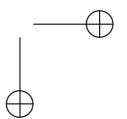
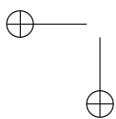
Open access



Cite this paper as: C. Franco, D. Guzmán-Cortés y J. Figueroa-García "Mathematical Model for Centralized Supply Chains with Decisions Involving Shared Resources", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 323-333 (2020).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.16921>



### Resumen

**Contexto:** La cooperación en la administración de las cadenas de suministro es un factor importante si se tiene en cuenta el desempeño global de los diferentes sectores de una cadena específica. En este sentido, aplicar estrategias logísticas como el VMI (*Vendor Managed Inventory*) permite a un sistema administrar los procesos de distribución desde un punto o depósito central. Asimismo, los componentes de la cadena trabajan más de cerca con la misma, lo cual permite incrementar el desempeño global, en vez de desarrollar cada sector individualmente.

**Método:** Se propone un modelo estocástico que considera una red de clientes, donde el envío de productos se realiza desde un depósito central. Los clientes de esta red pueden compartir parte de su producto con el depósito central para redistribución, en aras de minimizar los faltantes de otros clientes. Se propone un modelo matemático que incluye los elementos involucrados en los procesos de distribución, que después se reformula para considerar el faltante y la linealización de algunos de sus elementos.

**Resultados:** Los resultados muestran que implementar o adaptar estrategias logísticas, tales como la administración desde un punto central y compartir los recursos a través de la cadena de suministro, permite a las compañías reducir la complejidad de algunas decisiones y mejorar su desempeño.

**Conclusiones:** La implementación de estrategias logísticas tales como la administración centralizada y el uso de recursos compartidos a través de una red de suministro permite a las compañías reducir la complejidad de algunas decisiones y, a su vez, mejorar el desempeño global.

**Palabras clave:** Cadenas de suministro centralizadas, optimización bajo incertidumbre, recursos compartidos.

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

Information systems have had a fast development in last decades, so their integration into supply systems became a key task to implement different strategies, with the purpose of obtaining better overall results. For companies that mainly use roads to distribute products, appropriate management of goods and availability have become an important factor to satisfy customer requirements or demands.

Thus, companies should perform two tasks factors within the distribution process: (i) satisfying customer requirements and (ii) managing inventory levels. It is desirable to have a balance among inventory levels, costs, service levels, and speed of response, since lower inventory levels could mean lower inventory costs, but also shortages and/or lower service levels.

Correct coordination between different echelons of a supply chain can ensure an improvement in its global performance, and there is evidence of how linking internal processes or decisions to suppliers and customers lead to improvements due to integration and cooperation [1]. Thus, that which leads to distribute goods through a central depot or agency also leads to the implementation of vendor-managed inventory strategies [2]. This kind of logistic systems also shares resources with different echelons of the supply chain, which allows improving its overall performance. These resources can be used by a central depot to be delivered to other echelons with higher shortage risk or to reduce service levels.

This paper is then focused in a supply chain model with a central depot that shares resources with different echelons through coordinated decisions. The paper is organized as follows: section 2 consists of a literature review; in section 3, the proposed mathematical model is presented; section 4 comprises the analysis and results; and finally, conclusions are explained in detail.

## 2. Literature review

Several approaches have addressed the problem of distributing goods to a set of customers. For instance, Attiaa, Ghaithanb, and Duffuaa [3] develop a model for an oil and gas supply chain. They proposed a mathematical model that considers different echelons of the oil and gas supply chain from the production fields to final demand terminals using two objective functions: i) minimization of total costs and ii) maximization of revenue. It also solved a three-period example with a sensitivity analysis to finally determine the final price of the oil distributed through the network. A similar study was done by Huang *et al.* [4], where jet fuel distribution in accordance with production decisions was modeled using a multi-objective four-stage supply chain optimization model which considers total production costs and green emissions (a gas supply chain problem was also solved by Zarei and Amin-Naseri [5]).

Other studies aim to optimize distribution processes without considering special conditions such as the specific type of goods/products (those general problems can be solved using classic inventory routing problem models and their extensions). The problem addressed here consists to make distribution decisions over a planning horizon, a set of customers, vehicle capacity constraints, and customer inventory capacities. Furthermore, customers have their own demand that changes over time, as well as varying inventory capabilities. This problem has been previously studied in the literature with different extensions and variations. Some authors have developed some exact methods for analyzing different sizes of network instances in a deterministic environment [6]–[9]. Other authors consider uncertainty mostly over the demand and travel times [10]–[12] and other extensions [7], [13]–[15]. Fuzzy uncertainty was considered by López, Méndez, and Franco [16] for a design/distribution problem over supply chain networks with fuzzy demands (represented as fuzzy numbers) as an uncertainty source whose solution was provided as a three-stage linear optimization model.

Reverse logistic supply chain problems involving recycling products under uncertainty were solved by Kim, Chung, Kang, and Jeong, who proposed [17] the use of robust representation of uncertainty in two stages: i) a deterministic model and ii) adaptation of robust constraints. Some simulation-aided experiments were performed to emulate uncertain conditions and determine how robust variables work.

Nowadays, the global economy and highly competitive markets force companies to develop innovative strategies to achieve a high level of services to customers, so cooperation and collaboration between different echelons becomes an important strategy to improve performance at different levels of the supply chain. For example, the work by Quintero-Araujo, Gruler, Ángel, and Faulin [18] is based on the concept of vertical/horizontal cooperation, where metaheuristics were used for analyzing collaboration strategies in a distribution network with shared resources for three different scenarios: i) non-cooperative, ii) semi-cooperative, and iii) fully cooperative. In their study,

iii) showed lower costs as a result of less depots being opened and reduced routing costs.

A backhaul-based horizontal cooperation analyzing the effects of the cooperation and the environmental impact of road transportation was developed by Ángel, Faulin, Perez-Bernabeu, and Josewoiez [19]. Additionally, Caballini, Sacone, and Saeednia [20] used cooperation for drayage operations, where time windows, trip deadliness, and fleet size were considered over several experiments focused to analyze the number of trips, carrier profit, and others over an Italian real dataset.

This paper proposes a cooperation-inclusion model, where goods are delivered from a depot to a set of customers who can share them with the depot in order to satisfy requirements coming from customers in the network. Some healthcare, food, and humanitarian operations problems use a similar approach [21]–[25].

### 3. Proposed mathematical model

Demands are one of the main uncertainty sources in time horizon planning-based supply chains, so, in this paper, we considered them as stochastic variables. In this model, central depot determines replenishment/sharing decisions (similar to those strategies considered in VMI models [26]). In this sense, the main idea of the model is to determine when the product on inventory of a customer can be shared with the central depot for redistribution, aiming to minimize the stock outs of the network. The proposed mathematical model works with a planning horizon  $T$ , where a set of customers  $N$  or distribution points that belong to the network and the node  $n = 0$  correspond to the central depot. All customers have their own initial inventory levels  $II_n$ , and the central depot has its own, represented by  $II_0$ . For each time period, there is an amount of product  $Q_t$  available at the central depot that can be distributed along the network. Also, each node of the network must guarantee a minimum percentage of safety stock  $RS_n$  given stochastic demands  $d_{nt}$ . Key notations, set definitions, parameters and decision variables are defined as follows:

**Sets:**

- $T$  Set of planning horizon
- $N$  Set of customers

**Parameters:**

- $II_n$  Initial inventory levels at customer  $n \in N$
- $II_0$  Initial inventory levels at customer at central depot
- $Q_t$  Amount of product available that can be used by the central depot at period  $t \in T$
- $RS_n$  Risk index of safety stock of customer  $n \in N$
- $d_{nt}$  Stochastic demand at customer  $n \in N$  at time period  $t \in T$
- $r_n$  Risk aversion of customer  $n \in N$  of delivering product to the central depot

**Decision variables:**

- $x_{nt}$  Amount of product delivered by the central depot to customer  $n \in N$  at period  $t \in T$
- $y_{nt}$  Amount of product shared by customer to the central depot  $n \in N$  at period  $t \in T$
- $z_{nt}$  Amount of product available that can be used to satisfy the demand by customer  $n \in N$  at period  $t \in T$
- $I_{nt}$  Final inventory levels of customer  $n \in N$  at period  $t \in T$
- $SS_n$  Safety stock of customer  $n \in N$

The mathematical model proposed is as follows:

$$\text{Min } E \left[ \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} (d_{nt} - z_{nt})^+ \right] \quad (1)$$

Subject to:

$$I_{nt} = I_{nt-1} + x_{nt} - y_{nt} - z_{nt} \quad \forall n \in N/\{0\}, t \quad (2)$$

$$I_{0t} = I_{0t-1} + Q_t + \sum_{n \in N} y_{nt} - \sum_{n \in N} x_{nt} \quad \forall t \quad (3)$$

$$y_{nt} \leq r_n (I_{nt} - SS_n)^+ \quad \forall n \in N/\{0\}, t \quad (4)$$

$$I_n \geq SS_n \quad \forall n \in N/\{0\} \quad (5)$$

$$SS_{nt} \geq Rs_n * d_{nt} \quad \forall n \in N/\{0\}, t \quad (6)$$

$$\sum_{n \in N} x_{nt} \geq I_{0t-1} + Q_t + \sum_{n \in N} y_{nt} \quad \forall t \quad (7)$$

$$z_{nt} \leq d_{nt} \quad \forall n \in N/\{0\}, t \quad (8)$$

$$x_{nt}, y_{nt}, z_{nt}, I_{nt}, SS_{nt} \geq 0 \quad (9)$$

The objective function (1) aims to minimize expected shortages over the network for all periods of time. Constraint (2) represents customer inventory levels represented by the amount of product that comes from the central depot and the amount of product shared with the central depot in order to support other distribution points. The same idea goes to (3), where inventory levels are modeled for the central depot considering the amount of available product, the distributed product, and returns coming from other nodes of the network. Constraint (4) ensures the central depot to receive the amount of delivered product only if safety stocks are greater than inventory levels.

Constraint (5) sets the minimum inventory levels for each customer, given predefined safety stock levels. Those safety stocks are determined by Eq. (6) as the amount of product that customers are unable to share with the central depot due to uncertain demands. Constraint (7) ensures that the amount of product delivered from the central depot cannot exceed its availability. Eq. (8) guarantees that the amount of product sent to satisfy demands cannot exceed the customer demands. Finally, Eq. (9) defines the codomain of all decision variables.

Note that both the objective function (1) and constraint (4) are nonlinear. To linearize the objective function, we have added the new variable  $w_{nt}$  and the following constraint:

$$w_{nt} \geq d_{nt} - z_{nt} \quad \forall n \in N/\{0\}, t \quad (10)$$



Eq. (4) is also modified by adding a new binary variable  $g_{nt}$  as follows:

$$r_n(I_{nt} - SS_n) \geq M(g_{nt} - 1) \quad \forall n \in N/\{0\}, t \quad (11)$$

$$y_{nt} \leq r_n(I_{nt} - SS_n) + M(1 - g_{nt}) \quad \forall n \in N/\{0\}, t \quad (12)$$

$$y_{nt} \leq M g_{nt} \quad (13)$$

As the demand is assumed to be stochastic, uncertain demands are modeled by using possible scenarios. Therefore, we added a set of  $S$  scenarios indexed by the superscript  $\omega$ . Finally, the complete mathematical model is as follows:

$$\text{Min} \sum_{\omega \in S} p_{\omega} \left[ \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} w_{nt}^{\omega} \right] \quad (14)$$

$$I_{nt}^{\omega} = I_{nt-1}^{\omega} + x_{nt}^{\omega} - y_{nt}^{\omega} - z_{nt}^{\omega} \quad \forall n \in N/\{0\}, t, \omega \quad (15)$$

$$I_{0t}^{\omega} = I_{0t-1}^{\omega} + Q_t + \sum_{n \in N} y_{nt}^{\omega} - \sum_{n \in N} x_{nt}^{\omega} \quad \forall t, \omega \quad (16)$$

$$I_n^{\omega} \geq SS_n^{\omega} \quad \forall n \in N/\{0\}, \omega \quad (17)$$

$$SS_{nt}^{\omega} \geq R s_n * d_{nt}^{\omega} \quad \forall n \in N/\{0\}, t, \omega \quad (18)$$

$$\sum_{n \in N} x_{nt}^{\omega} \geq I_{0t-1}^{\omega} + Q_t + \sum_{n \in N} y_{nt}^{\omega} \quad \forall t, \omega, \quad (19)$$

$$z_{nt}^{\omega} \geq d_{nt}^{\omega} \quad \forall n \in N/\{0\}, t, \omega \quad (20)$$

$$w_{nt}^{\omega} \geq d_{nt}^{\omega} - z_{nt}^{\omega} \quad \forall n \in N/\{0\}, t, \omega \quad (21)$$

$$r_n(I_{nt}^{\omega} - SS_n^{\omega}) \geq M(g_{nt}^{\omega} - 1) \quad \forall n \in N/\{0\}, t, \omega \quad (22)$$

$$y_{nt}^{\omega} \leq r_n(I_{nt}^{\omega} - SS_n^{\omega}) + M(1 - g_{nt}^{\omega}) \quad \forall n \in N/\{0\}, t, \omega \quad (23)$$

$$y_{nt}^{\omega} \leq M g_{nt}^{\omega} \quad \forall n \in N/\{0\}, t, \omega \quad (24)$$

$$x_{nt}^{\omega}, y_{nt}^{\omega}, z_{nt}^{\omega}, I_{nt}^{\omega}, SS_{nt}^{\omega} \geq 0, g_{nt}^{\omega} \in \{0, 1\} \quad (25)$$

## 4. Experimentation

To test the proposed model, we used the instances presented by Coelho, Cordeau, and G. Laporte [9]. Three sets of probabilities were used to define and analyze scenarios:

1. *Average*: scenarios with the same probability of occurrence
2. *Extreme values with lower probability*: scenarios with probabilities higher than 0,25
3. *Extreme values with higher probability*: scenarios with probabilities higher than 0,75

Then, for each customer, different demand values were generated using different scenarios over different periods of time. In this sense, we generated the random variable  $d_{nt}^{\omega}$  using the instances proposed by Coelho, Cordeau, and G. Laporte [9] and the demand values to generate the different scenarios as previously shown with the aforementioned probabilities. Three performance measures were implemented to analyze the obtained results:

- *Shortage*: it is the shortage amount per customer, measured as the maximum and expected values of shortage.
- *Product share*: it is the amount of product shared to the central depot. Maximum values for the planning horizon and expected values are presented.
- *Product delivered to the customers*: it is defined as the expected value delivered to each customer per period.

An instance composed by 5 customers, 3 time periods, and a safety stock risk index and risk aversion of 0,2 per customer was implemented. Results are shown in Table I. To solve the proposed model, we used the Xpress-MP optimization software.

**Table I.** Results of the first configuration.

	Shortage		Product share		Average product delivered		
	Max.	Average	Max.	Average	1	2	3
1	656	271,23	0	0,00	67,8	12,1	0
2	121	70,63	0	0,00	6,6	17	0,6
3	108	47,50	4	0,01	9	5,1	0
4	96	48,43	0	0,00	8	33,2	40
5	294	55,43	40	0,39	0,8	15,9	0

Table I shows that, given the risk aversion and safety stock levels, the amount of shared product to the central depot is low with higher shortage levels. Fig. 1 shows the average amount of shortage inventory and demands of all customers.

It is clear that customers do not share product to the central depot when they have short demands, which implies higher shortage levels. Only customer 5 reports inventory levels greater than shortage/demand levels.

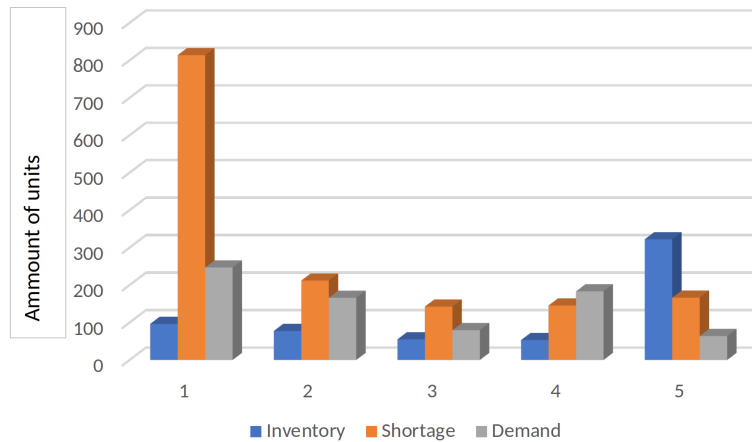


Figure 1. Comparison of behavior among customers.

The second probability scenario is presented in Table II. When comparing this scenario to Table I, lower demand levels are more probable, as well as, consequently, higher shortage average evels, whose maximum values remain the same regardless of average levels, so the amount of delivered product to customers from the central depot increases.

Table II. Results of the second configuration.

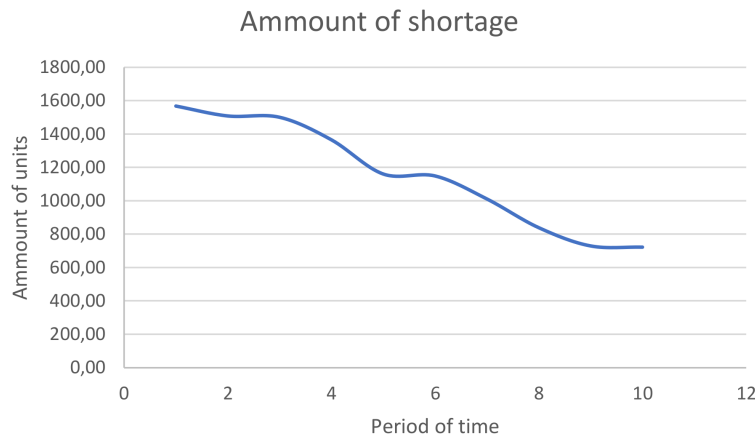
	Shortage		Product share		Average product delivered		
	Max.	Average	Max.	Average	1	2	3
1	656	787,38	0	0,00	71,375	11,9375	0
2	121	203,5	0	0,00	8,25	15,5	0,75
3	108	132,88	4	0,50	11,25	6,375	0
4	96	141,88	0	0,00	9,375	31,625	37,75
5	294	176,56	40	14,31	0,5	14,125	0

Finally, Table III shows the probability scenario. Again, both shortage levels for most customers and the amount of product delivered from the central depot increase.

Table III. Results of the third configuration.

	Shortage		Product share		Average product delivered		
	Max.	Average	Max.	Average	1	2	3
1	656	877,32	0	0,00	59,31	14,61	0,17
2	121	229,50	0	0,00	2,75	20,75	0,25
3	108	167,28	4	0,17	1,88	0,00	0,00
4	96	153,32	0	0,00	3,92	36,46	47,01
5	294	139,68	40	4,482	1,71	19,88	0,00

One of the main goals of this model is to evaluate the impact of sharing risks (or the desire of sharing products coming from customers' own depots) with the central depot. To analyze the



**Figure 2.** Variation of shortage versus the desire of sharing products to the central depot.

impact of this risk, an additional experiment was performed, whose results show that, given some demand levels, sharing risks decrease total system shortage (see Fig. 2). This leads us to think that integration is key in improving system performance.

## 5. Conclusions

In this paper, we presented a mathematical model for a supply network composed of a central depot and a set of customers with stochastic demands. The idea of collaboration among supply chain echelons consists of sharing resources to a central depot, which are then redistributed to other customers with stockout or demand peaks. This sharing strategy was implemented as a parameter of the model.

Experiments showed that, if the customers' resource sharing willingness desire increased (understood as customer risk), the total system shortage could be reduced, which implies collaboration among all supply chain echelons. The proposed model can be used as a tool for planning resources in a distribution network with high demand variability so their resources can be managed by a central depot.

Future work could include multi-product management problems and larger supply chain networks. This model does not require the implementation of different algorithms to solve large scale instances.

## References

- [1] D. P. Van Donk and T. Van Der Vaart, "A case of shared resources, uncertainty and supply chain integration in the process industry", *International Journal of Production Economics*, vol. 96, no. 1, pp. 97–108, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.03.002> ↑324

- [2] A. Mateen and A. K. Chatterjee, "Vendor managed inventory for single-vendor multi-retailer supply chains", *Decision Support Systems*, vol. 70, pp. 31–41, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.12.002> ↑324
- [3] A. M. Attiaa, A. M. Ghaithanb, and S. O. Duffuaa, "A multi-objective optimization model for tactical planning of upstream oil and gas supply chains", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 128, pp. 216–227, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.06.016> ↑325
- [4] E. Huang *et al.*, "Multi-objective optimization for sustainable renewable jet fuel production: A case study of corn stover based supply chain system in Midwestern U.S.", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115, 109403, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109403> ↑325
- [5] J. Zarei and M. Amin-Naseri, "An integrated optimization model for natural gas supply chain", *Energy*, vol. 185, pp. 1114–1130, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.117> ↑325
- [6] C. Cheng, P. Yang, Q. Mingyao, and L. Rousseau, "Modeling a green inventory routing problem with a heterogeneous fleet", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 97, pp. 97–112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.11.001> ↑325
- [7] S. H. Chung and C. Kwon, "Integrated supply chain management for perishable products: Dynamics and oligopolistic competition perspectives with application to pharmaceuticals", *International Journal of Production Economics*, vol. 179, pp. 117–129, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.021> ↑325
- [8] M. Gebicki, E. Mooney, S. J. Chen, and L. M. Mazur, "Evaluation of hospital medication inventory policies", *Health Care Management Science*, vol. 17, no. 3, pp. 215–229, 2014. <http://doi.org/10.1007/s10729-013-9251-1> ↑325
- [9] L. C. Coelho, J.-F. Cordeau, and G. Laporte, "Consistency in multi-vehicle inventory-routing", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 24, pp. 270–287, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.03.007> ↑325, 329
- [10] F. Morales, C. Franco, and G. Mendez-Giraldo, "Dynamic inventory routing problem: Policies considering network disruptions", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, no. 4, pp. 523–534, 2018. <http://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.11.001> ↑325
- [11] A. Baboli, J. Fondrevelle, R. Tavakkoli-Moghaddam, and A. Mehrabi, "A replenishment policy based on joint optimization in a downstream pharmaceutical supply chain: centralized vs. decentralized replenishment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 367–378, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3290-x> ↑325
- [12] F. Rayat, M. Musavi, and A. Bozorgi-Amiri, "Bi-objective reliable location-inventory-routing problem with partial backordering under disruption risks: A modified AMOSA approach", *Applied Soft Computing*, vol. 59, pp. 622–643, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.036> ↑325
- [13] C. Franco, E. R. López-Santana and, J. C. Figueroa-García, "Solving the interval green inventory routing problem using optimization and genetic algorithms", in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 742, pp. 556–564, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66963-2\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66963-2_49) ↑325
- [14] F. Morales, C. Franco, and G. A. Mendez-Giraldo, "Success probability applied to inventory routing problem with time windows", in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 742, pp. 522–531, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66963-2\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66963-2_49) ↑325
- [15] A. C. Amarao and A. P. Barbosa-Povoa, "Planning and scheduling of industrial supply chains with reverse flows: A real pharmaceutical case study", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 32, pp. 2606–2625, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.03.006> ↑325
- [16] E. López, G. A. Méndez, and C. Franco, "Diseño de cadenas de distribución con demanda bajo incertidumbre: una aproximación de programación lineal difusa", *Revista Ingeniería*, vol. 18, pp. 68–84, 2013. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2013.2.a05> ↑325
- [17] J. Kim, B. D. Chung, Y. Kang, and B. Jeong, "Robust optimization model for closed-loop supply chain planning under reverse logistics flow and demand uncertainty", *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 1314–1328, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.157> ↑325
- [18] C. L. Quintero-Araujo, A. Gruler, J. Ángel and J. Faulin, "Using horizontal cooperation concepts in integrated routing and facility-location decisions", *International Transactions in Operational Research*, vol. 26, no. 2, pp. 551–576, 2017. <https://doi.org/10.1111/itor.12479> ↑325
- [19] J. Ángel, J. Faulin, E. Perez-Bernabeu, and N. Josewoiez, "Horizontal Cooperation in Vehicle Routing Problems with Backhauling and Environmental Criteria", *Procedia. Social and Behavioral Sciences*, vol. 111, pp. 1133–1141, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.148> ↑326

- [20] C. Caballini, S. Sacone, and M. Saeednia, “Cooperation among truck carriers in seaport containerized transportation”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 93, pp. 38–56, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.05.007> ↑326
- [21] R. Uthayakumar and S. Priyan, “Pharmaceutical supply chain and inventory management strategies: Optimization for a pharmaceutical company and a hospital”, *Operations Research for Health Care*, vol. 2, no. 3, pp. 52–64, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2013.08.001> ↑326
- [22] W. Wakeland, S. Cholette, and K. Venkat, “Food transportation issues and reducing carbon footprint,” in *Green Technologies in Food Production and Processing*. Boston: Springer, 2012. ↑326
- [23] A. Cozzolino, S. Rossi, and A. Conforti, “Agile and lean principles in the humanitarian supply chain: The case of the United Nations World Food Programme”, *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, vol. 2, no. 1, pp. 16–33, 2012. <http://doi.org/10.1108/20426741211225984> ↑326
- [24] C. Franco, E. R. López-Santana, and J. C. Figueroa-García, “A Mathematical Model Under Uncertainty for Optimizing Medicine Logistics in Hospitals”, in *Applied Computer Sciences in Engineering. WEA 2018. Communications in Computer and Information Science*, vol. 916, pp. 53-60, Cham: Springer, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00353-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00353-1_5) ↑326
- [25] C. Franco, V. Augusto, T. Garaix, E. Alfonso-Lizarazo, M. Bourdelin, and H. Bontemps, “Strategic territorial deployment of hospital pharmacy robots using a stochastic p-robust optimization approach”, in *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Munich 2018, pp. 390–395. ↑326
- [26] C. Franco and J. C. Figueroa-García, “A column generation-based algorithm for solving combined inventory and routing problems.” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 24, no. 2, pp. 305–313, 2016. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052016000200012> ↑326

### Carlos Franco

Ph.D In Logistics and Supply Chain from Universidad la Sabana; M.Sc. in industrial engineering with major in Operations Research and Statistics from Universidad de los Andes; Bachelor’s degree in Industrial Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Principal Professor at Universidad del Rosario. He works on the management group of Universidad del Rosario under the Supply Chain Management research area. His main research interests are related with mathematical modeling for logistic and healthcare systems.

E-mail: carlosa.franco@urosario.edu.co

### Diana Carolina Guzmán-Cortés

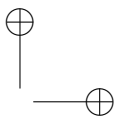
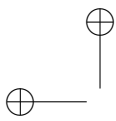
Ph.D candidate in Logistics and Supply Chain Management at Universidad de la Sabana; M.Sc. in Design and Process Management with major in Logistics Systems from Universidad de La Sabana and Bachelor’s degree in Industrial Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Her main research interests include humanitarian logistics and supply chain management.

E-mail: dianaguco@unisabana.edu.co

### Juan Carlos Figueroa-García

He received the B.S. and M.S. degrees in Industrial Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2002/2009, and the Ph.D. degree in Industrial Engineering (meritorious degree) from Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, in 2014. Since 2006, he has been a full-time teacher and researcher of the Engineering Faculty from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, in the area of statistics and operations research. He has co-edited different Springer LNCS/CCIS volumes and IEEE conference proceedings. He has also authored several book chapters and multiple scientific papers. He was awarded with the International Fuzzy Systems Association (IFSA) “Young Scientist Award” in 2012, the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS) “Best Interval paper award” in NAFIPS–IFSA conference in 2013, and the NAFIPS “Outstanding Paper” award in 2010. He is an IEEE Senior member, and currently serves as one of the board of directors of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS). His main research interests include fuzzy measure, Type-2 fuzzy sets, fuzzy optimization and fuzzy statistics.

E-mail: jcfigueroag@udistrital.edu.co



Research Paper

REVISTA  
Ingeniería

# Optimal Placement of Capacitors, Voltage Regulators, and Distributed Generators in Electric Power Distribution Systems

*Ubicación óptima de capacitores, reguladores de tensión y generadores distribuidos en sistemas eléctricos de distribución*

Luis A. Gallego Pareja <sup>1</sup>, Jesús M. López-Lezama <sup>\*,2</sup>, Oscar Gómez Carmona <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, State University of Londrina (UEL), Londrina 86057-970, PR, Brazil,

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Calle 67 No. 53-108, Medellín, Colombia, <sup>3</sup>Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira, Cr 27 No 10-02, Pereira, Colombia

\*Correspondence email: [jmaria.lopez@udea.edu.co](mailto:jmaria.lopez@udea.edu.co)

Received: 01-06-2020. Modified: 31-08-2020. Accepted: 15-09-2020

## Abstract

**Context:** With the advent of the smart grid paradigm, electrical distribution network (EDN) operators are making efforts to modernize their power grids through the optimal implementation of distributed generators (DGs) and other devices such as capacitors (CAs) and voltage regulators (VRs). The optimal allocation of such devices is a challenging task involving discrete and integer decision variables.

**Method:** This paper presents an approach for the optimal placement of CAs, VRs and DGs in EDNs. The distinctive feature of the proposed model is the fact that it can be used to optimize the allocation of all of these elements together, in pairs, or separately. The optimal implementation of these elements is formulated as a mixed integer nonlinear programming (MINLP) problem, and it is solved by means of a specialized genetic algorithm (SGA).

**Results:** The proposed methodology was tested on the IEEE 69-bus test system. The results were compared with previous works from the specialized literature, showing the effectiveness and robustness of the model.

**Conclusions:** It was found that the appropriate allocation of CAs, VRs, and DGs results in a significant power loss reduction. It was also found that the proposed model is faster than other techniques proposed in the specialized literature.

**Keywords:** capacitor banks, distributed generation, distribution networks, voltage regulators.

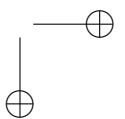
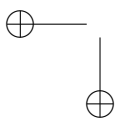
**Acknowledgements:** The authors gratefully acknowledge the support from the *Colombia Científica* program, within the framework of the *Ecosistema Científico* (Contract No. FP44842- 218-2018). The authors also acknowledge the support of the State University of Londrina and Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).

**Language:** English.

Open access



© The authors; licensee: Revista INGENIERÍA. ISSN 0121-750X, E-ISSN 2344-8393. Cite this paper as: L.A Gallego-Pareja, J.M. López-Lezama, O. Gómez-Carmona: "Optimal Placement of Capacitors, Voltage Regulators and Distributed Generators in Electric Power Distribution Systems". INGENIERÍA, Vol. 25, Num. 3, 334-354 (2020). [doi:10.14483/23448393.16925](https://doi.org/10.14483/23448393.16925)



### Resumen

**Contexto:** Con la llegada del paradigma de las redes inteligentes, los operadores de redes de distribución eléctrica (RDE) están haciendo esfuerzos para modernizar sus redes a través de la implementación óptima de generadores distribuidos (GDs) y otros dispositivos como condensadores (CAs) y reguladores de tensión (VRs). La ubicación óptima de estos dispositivos es una tarea desafiante que involucra variables de decisión discretas y enteras.

**Método:** Este artículo presenta una metodología para la colocación óptima de CAs, VRs y GDs en RDEs. La característica distintiva del modelo propuesto es el hecho de que se puede utilizar para optimizar la ubicación de todos estos elementos a la vez, en pares o por separado. La implementación óptima de estos elementos se formula como un problema de programación no lineal de enteros mixta (PNLEM), y se resuelve mediante un algoritmo genético especializado (AGE).

**Resultados:** La metodología propuesta se probó en el sistema de prueba IEEE de 69 barras. Los resultados se compararon con trabajos previos de la literatura especializada, mostrando la efectividad y robustez del modelo.

**Conclusiones:** Se encontró que la ubicación adecuada de CAs, VRs y GDs resulta en una reducción importante de pérdidas de energía. También se encontró que el modelo propuesto es más rápido que otras técnicas propuestas en la literatura especializada.

**Palabras clave:** bancos de capacitores, generación distribuida, redes de distribución, reguladores de tensión.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen el financiamiento del programa Colombia Científica, en el marco de la convocatoria Ecosistema Científico (Contrato No. FP44842- 218-2018). Los autores también agradecen el apoyo de la Universidade Estadual de Londrina y la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

The expansion planning of capacitors (CAs), voltage regulators (VRs), and distributed generators (DGs) in electrical distribution networks is carried out to achieve one or more of the following objectives: 1) power loss reduction 2) voltage profile improvement, 3) power factor correction, and 4) increasing circuit capacity [1]. The optimal allocation of these components can be formulated as a mixed integer nonlinear programming (MINLP) problem. This problem exhibits high mathematical complexity and involves the phenomenon of combinatorial explosion, which means that the number of possible solutions grows exponentially with the size of the electrical network [2].

The challenge of optimally placing CAs, VRs, and DGs consists of determining their type, quantity, locations, active and reactive power injections, and position of taps (for VRs) that must be set up in a distribution network with minimum investment cost to address a forecasted demand. Several mathematical optimization techniques have been reported to solve the optimal placement of CAs, VRs, and DGs either separately or together. [3]

Given specific conditions such as differentiability and convexity, exact algorithms have the ability to find the global optimal solution of the problem under study. These algorithms include Branch and Bound, decomposition, and cutting methods [4], [5]. In most power system applications, the



implementation of such algorithms requires a process with high mathematical complexity [1].

Metaheuristic algorithms, on the other hand, are designed to deal with non-linear, non-convex, and multi-modal optimization problems such as the optimal allocation of elements in distribution networks. These techniques have been used to solve the optimal placement of CAs, VRs, or DGs, and they are able to find high-quality solutions and even, in some cases, global optimal solutions with low computational effort. Traditionally, the allocation of DGs has been treated independently from the allocation of CAs and VRs. There are many studies regarding the proper allocation of both CAs and VRs. These methods include Tabu Search (TS) [2], genetic algorithms (GAs) [6], particle swarm optimization (PSO) [7], [8], harmony search (HS) [9], ant colony optimization (ACO) [10], [11] the combination of genetic algorithms and fuzzy logic [12], cuckoo search (CS) [13], immune-based optimization algorithms [14], and clustering-based optimization (CBO) [15], among others.

The expansion planning of CAs and VRs in electrical distribution networks is important for controlling the voltage profile, mainly in heavily loaded feeders, where there might be voltage drop issues. The optimal sizing, location, and control of VRs and CAs in distribution networks have been addressed by some studies [16]–[18], where each problem is solved separately. Moreover, these problems can also be considered jointly as in [1], where the optimal placement of CAs and VRs was modeled as a “Mixed Integer Linear Programming (MILP)” problem for radial networks. Sugimoto, Yokoyama, and Fukuyama [19], proposed the allocation and control of VRs through TS, and GAs were applied in [20]–[23] to solve the optimal placement of both CAs and VRs. In most of these references, the model is formulated as a MILP problem, and different load levels are considered.

Regarding distributed generation, several studies have been conducted for its proper integration in distribution systems. For instance, methods based on classical mathematical programming are explored in [24]–[26]. Usually, these methods resort to a linearized model of the network, ignoring the reactive component. Metaheuristic methods have proven to be effective in finding high-quality solutions to the problem of optimal allocation and sizing of DGs. These methods include PSO [27], GAs [28], artificial bee colony algorithms [29], immune algorithms [30], TS [31], scatter search algorithms [32], and chaotic algorithms [33], among others. Reviews regarding the optimal allocation of DGs can be consulted in [34] and [35].

Table I presents a brief summary of the main studies reported in the specialized literature regarding the expansion planning of CAs, VRs, and DGs in electrical distribution networks (EDNs). A distinctive feature of this work is the fact that it considers the allocation of all these elements together in a single optimization approach.

This paper proposes a specialized genetic algorithm (SGA) to solve the optimal implementation of CAs, VRs, and DGs. The main characteristics of an SGA are summarized as follows: 1) the objective function is divided into a *Fitness* and *Penalty* functions, where the former represents investment and operational cost, while the later penalizes violations of network constraints; 2) only one individual or candidate solution is created in each iteration, which must be different from all individuals of the current population; 3) throughout an iterative process, the best individuals are preserved; and 4) a local intensive search is performed in each iteration to check for better indi-

**Table I.** Optimal allocation of VRs, CAs and DGs in EDNs

Reference	Approach		Allocation of Elements			
	Exact	Metaheuristic	Fixed CAs	Switched CAs	VRs	DGs
[19]		×			×	
[8], [9], [11], [36]		×	×			
[7], [10], [13], [15]		×	×	×		
[21], [23]		×	×		×	
[1], [16]–[18]	×		×	×	×	
[20], [22]		×	×	×	×	
[24]–[26], [37], [38]	×					×
[27], [29]–[31], [39], [40]		×				×
This work		×	×	×	×	×

viduals. The main contribution of this paper consists on a novel modeling and solution approach for the optimal implementation of CAs, VRs, and DGs as fundamental elements of the expansion planing of EDNs. In contrast with traditional approaches that consider the allocation of one or two types of these devices, this paper deals with the joint optimal allocation of CAs, VRs, and DGs. Moreover, both fixed and switchable capacitors are considered, and the optimal allocation of CAs, VRs, and DGs can be performed considering all types of elements together: by pairs or separately. Regarding distributed generation, the codification of the SGA provides both the optimal sizing and dispatch of DGs for every load level under consideration. Finally, the proposed approach is easy to implement, and due to its robustness and effectiveness, it can be applied in real-size distribution systems.

This paper is organized as follows: in Section 2, the proposed mathematical modeling is presented; then, the SGA used to solve the optimal placement of CAs, VRs, and DGs is described in Section 3; Section 4 presents the tests and results, as well as a comparative analysis with other works reported in the specialized literature; and, finally, conclusions are presented in Section 5.

## 2. Mathematical modeling

This section presents the proposed mathematical modeling for the optimal allocation of CAs, VRs, and DGs in EDNs. For the sake of simplicity, the representation of the steady-state operation of the EDNs under study is performed under the following hypotheses: 1) loads are modeled as constant power injections; 2) EDNs are represented by their single-phase equivalent; 3) real and reactive power losses on branch  $ij$  are concentrated in node  $i$ ; 4) only one type of capacitor (either fixed or switched) is permitted to be installed at a given bus.

The optimal placement of CAs, VRs, and DGs in EDNs can be formulated as an MINLP problem as follows:

$$\text{minimize } f = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 \quad (1)$$

where:

$$f_1 = k_e \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{d \in \Omega_d} c_d T_d R_{ij} |I_{ij,d}|^2 \quad (2)$$

$$f_2 = k_{cp} \sum_{i \in \Omega_b} \sum_{f \in \Omega_f} \left( c_{i,f}^{fx} q_{i,f}^{fx} + c_{un,f}^{fx} n_{i,f}^{fx} \right) \quad (3)$$

$$f_3 = k_{cp} \sum_{i \in \Omega_b} \sum_{s \in \Omega_s} \left( c_{i,s}^{sw} q_{i,s}^{sw} + c_{un,s}^{sw} n_{i,s}^{sw} \right) \quad (4)$$

$$f_4 = k_{vr} \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{r \in \Omega_r} c_{ij,r}^{vr} r_{ij,r}^{vr} \quad (5)$$

$$f_5 = k_{dg} \sum_{i \in \Omega_b} \sum_{d \in \Omega_d} \sum_{g \in \Omega_g} c_{i,d,g}^{dg} g_{i,g}^{gd} P_{i,d,g}^{dg} \quad (6)$$

s.t:

$$P_{i,d}^S - \sum_{ij \in \Omega_l} \left( P_{ij,d} + R_{ij} |I_{ij,d}|^2 \right) + g_{i,g}^{gd} P_{i,d,g}^{dg} = P_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b; \quad \forall d \in \Omega_d \quad (7)$$

$$Q_{i,d}^S - \sum_{ij \in \Omega_l} \left( Q_{ij,d} + X_{ij} |I_{ij,d}|^2 \right) + g_{i,g}^{gd} Q_{i,d,g}^{dg} + Q_{i,d}^{fx} n_i^{fx} + Q_{i,d}^{sw} n_i^{sw} = Q_{i,d}^D; \quad \forall i \in \Omega_b; \quad \forall d \in \Omega_d \quad (8)$$

$$V_i^2 - 2(R_{ij} P_{ij} + X_j Q_{ij}) + Z_{ij}^2 \cdot I_{ij}^2 - V_j^2 = 0; \quad \forall ij \in \Omega_l; \quad \forall d \in \Omega_d \quad (9)$$

$$I_{ij}^2 V_j^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2; \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (10)$$

$$\underline{P}_i^S \leq P_{i,d}^S \leq \overline{P}_i^S; \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (11)$$

$$\underline{Q}_i^S \leq Q_{i,d}^S \leq \overline{Q}_i^S; \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (12)$$

$$\underline{V}_i \leq V_{i,d} \leq \overline{V}_i; \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (13)$$

$$|I_{ij,d}| \leq \overline{I}_{ij}; \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (14)$$

$$\underline{P}_{i,dg} \leq P_{i,d,g}^{dg} \leq \overline{P}_{i,dg}; \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (15)$$

$$\underline{Q}_{i,dg} \leq Q_{i,d,g}^{dg} \leq \overline{Q}_{i,dg}; \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (16)$$

$$tap_{ij,d} = \left( \frac{V_{j,d}^{reg} - V_{j,d}}{0.00625} \right); \in Z^+ \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (17)$$

$$V_{j,d} = a_{R_{ij,d}} \times \tilde{V}_{j,d} \quad \forall ij \in \Omega_l; \quad \forall d \in \Omega_d \quad (18)$$

$$a_{R_{ij,d}} = 1 + 0.00625 \times tap_{ij,d}; \quad \forall (i,j) \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (19)$$

$$\underline{tap} \leq tap_{ij,d} \leq \overline{tap} \quad \forall (i,j) \in \Omega_l; \quad \forall d \in \Omega_d \quad (20)$$

$$tap_{ij,d} \in Z^+ \quad \forall ij \in \Omega_r; \quad \forall d \in \Omega_d \quad (21)$$

$$\sum_{i \in \Omega_b} q_i^{fx} \leq \overline{f}^{fx} \quad (22)$$

$$0 \leq n_i^{fx} \leq \overline{n}^{fx} \quad (23)$$

$$\sum_{i \in \Omega_b} q_i^{sw} \leq \overline{n}^{sw} \quad (24)$$

$$0 \leq n_i^{sw} \leq \overline{n}^{sw} \quad (25)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{r \in \Omega_r} r_{ij,r}^{vr} \leq \overline{n}^{vr} \quad (26)$$

$$\sum_{i \in \Omega_b} \sum_{g \in \Omega_g} g_{i,g}^{gd} \leq \overline{n}^{dg} \quad (27)$$

$$0 \leq n_{i,g}^{dg} \leq \overline{n_{i,g}^{dg}} \quad (28)$$

$$q_i^{fx} \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in \Omega_b \quad (29)$$

$$q_i^{sw} \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in \Omega_b \quad (30)$$

$$r_{ij,r}^{vr} \in \{0, 1\}; \quad \forall ij \in \Omega_l, \quad \forall r \in \Omega_r \quad (31)$$

$$g_{i,g}^{gd} \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in \Omega_b, \quad \forall g \in \Omega_g \quad (32)$$

Equation (1) represents the objective function that consists of minimizing the investment cost of new elements (CAs, VRs, and GDs), and the operation cost of the network (power loss cost). This function consists of five terms. The first term, given by Equation (2) and labeled as  $f_1$ , represents the cost of power losses. The second and third terms, given by Equations (3) and (4), labeled as  $f_2$  and  $f_3$ , respectively, are the investment cost of installing fixed and switched capacitors. The fourth term, given by Equation (5) and labeled as  $f_4$ , is the investment cost of installing VRs. Finally, the fifth term, given by Equation (6) and labeled as  $f_5$ , represents the investment cost of installing DGs. Parameters  $k_{cp}$ ,  $k_{vr}$ , and  $k_{dg}$  convert the present investment value into equal annual payments over a specified time, at a specified discount rate or interest. Parameter  $k_e$  is the interest rate of the total cost of power losses.

Equations (7) and (8) represent the active and reactive power balance constraints. Equation (9) is the voltage drop at branch  $ij$  for the load level  $d$ . Equation (10) represents the apparent power flow at branch  $ij$  for the load level  $d$ . Equations (11) and (12) represent the limits on active and reactive power injection of a substation located at node  $i$ . Equations (13) and (14) represent the voltage and current limits in every load level  $d$ , respectively. Equations (15) and (16) represent active and reactive power injection limits of a DG located at node  $i$ , for the load level  $d$ . Equations (17)-(21) describe the VR modeling. Equations (22)-(28) correspond to the maximum number of elements that can be added to the network (fixed and switched CA, VRs, and DGs, respectively). Equations (29)-(32) are constraints of binary nature for allocation of fixed or switched capacitors, voltage regulators, and distributed generators, respectively. An element is placed if the corresponding value is equal to one and is not placed if it is equal to zero.

The model described above represents a nonlinear multimodal problem which can be better handled by metaheuristic techniques. In this case, an SGA was developed to find high quality solutions to the problem. Such SGA is described below.

### 3. Specialized Genetic Algorithm (SGA)

Genetic algorithms are methodologies that can solve combinatorial optimization problems of high mathematical complexity with low computational effort. In this paper, a specialized genetic algorithm (SGA) is used to solve the optimal placement of CAs, VRs, and DGs. Fig. 1 presents the flowchart of the proposed SGA. The flowchart shows several control parameters, such as:  $k_{ps}$ ,  $k_{sr}$ ,  $k_{mr}$ ,  $k_{max}$ , and  $k_{of}$ , which are population size, selection rate, mutation rate, maximum number of iterations, and maximum number of iterations without improvement of the objective function (incumbent), respectively.

#### 3.1. Codification

The codification of the SGA is illustrated in Fig. 2. An individual of the population (also known as solution candidate or configuration) is represented by a matrix of size  $nd \times nt$ , where  $nd$  represents the load levels, and  $nt$  is equal to: the number of candidate buses ( $nb$ ) where fixed CAs can be allocated, plus the number of candidate buses ( $nb$ ) where switched CAs can be allocated, plus the number of candidate lines ( $nl$ ) where

VRs can be allocated, plus the number of candidate buses ( $nb$ ) where DGs can be allocated.

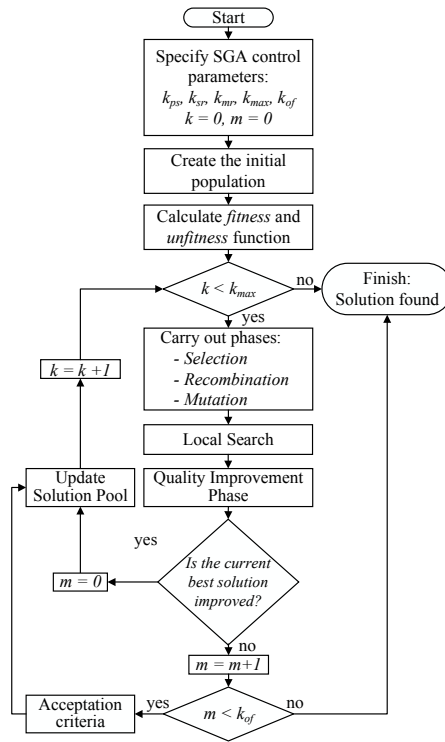


Figure 1. Flowchart of the proposed SGA.

	$nb$				$nb$				$nl$				$nb$													
Load level 1	0	...	1	0	2	0	0	...	0	3	0	0	0	0	1	...	0	...	0	0	0	0	0	897	0	0
Load level 2	0	...	1	0	2	0	0	...	0	2	0	0	0	0	1	...	0	...	0	0	0	0	0	642	0	0
Load level 3	0	...	1	0	2	0	0	...	0	1	0	0	0	0	1	...	0	...	0	0	0	0	0	355	0	0
⋮																										
	1	...	50	80	100	135	1	...	50	80	100	135	1-2	2-3	4-5	...	71-72	...	133-134	1	...	50	80	100	135	
	Fixed capacitors				Switched capacitors				Voltage regulators				Distributed generators													

Figure 2. Proposed codification of candidate solutions.

In the case of fixed CAs (see first section of Fig. 2), a value other than zero indicates the number of standard capacitor units installed at bus  $i$ . This number is the same for all load levels under consideration. The first section of Figure 2 shows the representation of one fixed CA installed at bus 50, and two fixed CAs installed at bus 100. If the reactive power of each fixed CA unit is 300 kVAr, the codification represents injections of 300 kVAr and 600 kVAr ( $Q_{50}^{fx} = 300$  kVAr,  $Q_{80}^{fx} = 600$  kVAr), at buses 50 and 100, respectively. In the case of switched CAs (see second section of Fig. 2) a value other than 0 states that the number of standard

capacitor units of switched capacitors can be different in each load level. According to Fig. 2 one switched capacitor is installed at bus 80. In this case, three load levels are considered (heavy, average, and light). If the reactive power of each switched CA unit is 300 kVAr, the proposed codification represents an injection of 900 kVAr for the heavy load level, 600 kVAr for the average load level, and 300 kVAr for the light load level.

The third section of Fig. 2 shows the codification of VRs. A value other than zero indicates the presence of a VR in branch  $ij$ . The value within the cell indicates the type of VR. This number is equal for all load levels. The Tap positions of the VRs are calculated according to Equation 17.

The fourth section of Fig. 2 shows the codification for DGs allocation. A value other than 0 in the vector indicates the presence of a DG unit installed at bus  $i$ . The value within the cell indicates the active power dispatch of such unit. For example, if the maximum active power of a DG is 1000 kW, and it is modeled with steps of 1 kW, the value in the cell, according to the proposed codification, can vary from 0 to 1000 steps. In the fourth section of Fig. 2 the value within the cell for heavy load level is 897, which indicates an active power injection of 897 kW. For the average and light load levels, the dispatch of such unit is 642kW and 355kW, respectively. A default power factor is used to calculate the reactive power injection of the DGs. The power supplied by them is a continuous variable. However, in the proposed codification, it is considered as discrete. This is not a drawback, since the proposed codification allows considering a fine-grain discretization of this variable. For example, if the maximum active power of a given DG unit is 1000 kW with steps of 0,01 kW, the value in the corresponding cell varies from 0 to 100,000. If the value of the cell is 99,445 the active power dispatch is 994,45 kW.

### 3.2. Initial population

The GA requires an initial population that will be modified and improved over the next iterations. In the proposed methodology, the initial population is generated in a randomly controlled way. The number of individuals of the population is given by  $k_{ps}$ . Since every individual of the population is represented by a matrix of four components (fixed and switched CAs, VRs, and DGs), each component is treated differently (see Fig. 2).

For fixed capacitors, a random number between 0 and  $n_i^{fx,max}$  is selected; for example, if this number is 3, then 3 buses are randomly selected to allocate fixed CAs. Then, a new random number between 0 and  $n_i^{fx,max}$  is selected for every bus in which the fixed capacitors are allocated in order to assign their respective sizes. The same procedure is executed for the case of switched capacitors. For voltage regulators, a random number between 0 and  $n^{vr,max}$  is selected; for example, if this number is 2, then 2 branches are randomly selected to allocate VRs. After that, a new random number is selected for each voltage regulator to account for its type. Finally, regarding distributed generation, a random number between 0 and  $n^{dg,max}$  is selected, and these DG units are randomly allocated in the network. After that, for each bus with DGs, a new number between 0 and  $n_i^{dg,max}$  is also selected to account for their respective capacity.

### 3.3. Objective function

In the proposed SGA, the objective function  $f_o$  consists of a fitness ( $f$ ) and a penalty ( $P$ ) function, as indicated by Equation (33). The fitness function  $f$  corresponds to the annualized investment cost of the new elements installed in the network (CAs, VRs, and DGs) plus the cost of power losses (operational cost), and it is given by Equation (1). The second component of the objective function is a penalization applied to

non-feasible solution candidates.

$$\text{minimize } fo = f + P \quad (33)$$

In this case,  $P$  is a penalty used for those individuals or solution candidates that violate constraints (11)-(16) and (20)-(28). If a given solution candidate does not violate these constraints, then the penalty is 0.  $P$  is given by Equation (34), where  $\mu$  is the penalization factor,  $x_i$  is the decision variable, and  $\underline{x}_i$  and  $\overline{x}_i$  represent its minimum and maximum limits.

$$P = \mu \sum_{i \in \Omega_p} (\max(x_i - \underline{x}_i, 0) + \max(\overline{x}_i - x_i, 0)) \quad (34)$$

Once the SGA generates a candidate solution (see Fig. 2) for the allocation of CAs, VRs, and/or DGs, the MINLP problem given by Equations (1)-(32) is turned into a nonlinear programming (NLP) problem. That is because the integer variables of the model are coded within the candidate solution of the SGA. The equivalent NLP problem is solved by means of a power flow. In this work, the backward/forward sweep power flow algorithm presented by Cheng and Shirmohammadi [41] was implemented. The power flow is computed to determine the stationary state of the network and determine voltages, currents, and power losses. Once the power flow has been calculated, constraints (11)-(16) and (20)-(28) are checked for feasibility. If any of these constraints are not held, the proposed candidate solution is considered unfeasible, and it is thus penalized as indicated by Equation (34).

### 3.4. Selection

In this step, a reduced number ( $k_{sr}$ ) of candidate solutions (or configurations) of the current population, are randomly chosen to compete with each other and choose one configuration known as *parent*. The configuration with the best objective function of the reduced list of configurations is chosen. This procedure is executed twice to select two *parents* to be used in the recombination mechanism.

### 3.5. Recombination

In this step, the two *parents* chosen in the selection process are considered. Recombination consists of exchanging information between two arrays (*parents*) to create two new arrays named *offspring*. In this case, the recombination is performed by type of element, since fixed or switched CAs cannot combine with VRs or DGs and vice-versa. Once the recombination process is complete, two new individuals are created. The next step consists on evaluating the objective function of each individual and selecting the best one to continue with the next steps of the SGA (mutation, local search, quality improvement, and acceptance criteria).

### 3.6. Mutation

The mutation process is the main mechanism that introduces diversity in the algorithm. In this paper, the mutation mechanism is used to add or remove a single unit of CAs, VRs, or DGs. This procedure considers account a mutation rate  $k_{mr}$  corresponding to a pre-specified percentage of the total number of buses (in the case of allocating CAs or DGs) or branches (in the case of VRs) of the network.

### 3.7. Local search

In order to improve the quality of the current solution, a local search is performed to verify whether placing CAs or DGs at neighboring buses, or VRs in neighboring branches, improves the Fitness Function without

introducing penalties. If this happens, the CA, VR, or DG is located at the new bus or branch; otherwise, it remains in its original location.

### 3.8. Quality improvement phase

Some elements (CAs, VRs, and/or DGs) of the proposed *offspring* may increase the total investment cost. Therefore, such elements must be removed from the solution. The unnecessary elements are those that can be discarded without modifying the penalty function (that is, without violating constraints) and represent a cost reduction. To eliminate such elements, they are sorted in descending order of their investment cost, and they are removed one by one. Every time an element is removed, a power flow is calculated to verify the fitness and penalty functions. At the end of this process, only the elements that do not modify the penalty function and worsen the fitness function are part of the solution proposal.

### 3.9. Acceptation criteria

In the proposed SGA, a new *offspring* is created in each iteration, so it is incorporated into the current population if its objective function  $z$  is better than the individual with the worst objective function in the current population. Furthermore, the new *offspring* must be different from all individuals of the current population; otherwise, the individual is discarded.

### 3.10. Stopping criteria

There are two stopping criteria for the SGA: the algorithm stops either when a maximum of iteration is reached, or when there has been a predetermined number of iterations ( $k_{of}$ ) without improvement of the objective function.

## 4. Tests and results

The IEEE 69-bus system was used to demonstrate the performance and robustness of the proposed approach. The system under study has a voltage level of 12,66 kV, and it must supply a total load of (3.802, 19 + j2.694, 59) kVA. The distribution system data are available in [42]. The proposed methodology was implemented in the C++ programming language. All simulations were carried out on a personal computer with an Intel Core™ i-7 3632MQ CPU @ 2.20 Ghz and 8GB of RAM memory.

The following values were considered in the model:  $k_{cp}$ ,  $k_{vr}$ ,  $k_{dg}$ , and  $k_e$  are equal to 1,0;  $c_f^{ifw}$  and  $c_s^{isw}$  are equal to US\$ 1.000,  $c_f^{ufx}$  and  $c_s^{usw}$  are equal to US\$ 900;  $Q_{i,d}^{fx}$  and  $Q_{i,t}^{sw}$  are equal to 300 kVAr,  $n^{fx,max}$ ;  $n^{sw,max}$  are equal to 3; and  $n_i^{fx,max}$ ,  $n_i^{sw,max}$  are equal to 4. Two types of VRs were considered with annualized costs of US\$ 10.000 and US\$20.000 and maximum current magnitudes of 200 A and 400 A, respectively. The values of  $n^{vr,max}$  and  $n^{dg,max}$  are equal to 2. The value of  $\mu$  for the penalty function is equal to  $10^6$  for all tests. For comparative purposes, costs for fixed and switched CAs were considered to be the same. However, considering different costs for these elements is straightforward. It is worth noting that, 100 runs were initially performed for the tuning of the SGA parameters (selection and mutation rates as well as initial population size).



#### 4.1. Description of tests

Thirteen tests were performed on this system. The first twelve tests were performed considering three load levels that were obtained with load factors of  $S_0 = 1,0$  (heavy),  $S_1 = 0,8$  (average), and  $S_2 = 0,5$  (light), with a duration of  $T_0 = 1.000$  h,  $T_1 = 6.760$  h and  $T_2 = 1.000$  h. The energy cost for all load levels was:  $c_{0,1,2} = 0,06$  US\$/kWh. The minimum voltage magnitude was considered to be 0,95 p.u. The last test was performed considering three load levels that were obtained by using load factors  $S_0 = 1,25$ ,  $S_1 = 1,00$ , and  $S_2 = 0,625$ , with a duration of  $T_0 = 1.000$  h,  $T_1 = 6.760$  h, and  $T_2 = 1.000$  h. The energy cost was  $c_0 = 2,95$  US\$/kWh,  $c_1 = 1,78$  US\$/kWh, and  $c_2 = 0,7$  US\$/kWh; and the value of  $V^{min} = 0,9$  p.u and  $V^{max} = 1,05$  p.u. These values are the same as those considered in [36]. The control parameters of the SGA were as follows: the initial population size ( $k_{ps}$ ) was 50, the rate by tournament ( $k_{sr}$ ) was 3, the mutation rate ( $k_{mr}$ ) is 3%, the maximum number of iterations ( $k_{Max}$ ) was 10.000, and the maximum number of iterations without improvement of the objective function (incumbent) ( $k_{of}$ ) was 1.000.

The thirteen tests performed in this system were labeled according to the elements to be optimally allocated (see first column of Table II). Test 1 corresponds to the initial state (IS) of the distribution network. Tests 2 and 3 (labeled as CA and VRA) correspond to the optimal allocation of capacitors and voltage regulators, respectively. Test 4 corresponds to the optimal allocation of capacitors and voltage regulators (CA-VRA). Test 5 was designed to compare the data with [1]. To this effect, a DG unit of 1.000 kW and a power factor of 0,95 was introduced in the initial system. Tests 6 to 8 were designed for the optimal allocation of capacitors (CA), voltage regulators (VRA), and both (CA-VRA), considering the previous DG unit introduced in test 5. In test 9, the optimal allocation of capacitors, voltage regulators and distributed generators (CA-VRA-DGA) was performed jointly. In Test 10, the optimal allocation of a single DG unit was performed ( $n^{dg, max} = 1$ ), with a maximum active power of 1.000 kW and a power factor of 0,95 lagging. The total installation cost ( $c_{i,g}^{dg}$ ) was US\$ 50.000. The active power was discretized in steps of 0,01 kW, each with an operation cost ( $c_{i,g,d}^{dg}$ ) of 0,5 US\$ for all load levels. The solution of Test 10 was used as the initial state (IS-DGA) for Tests 11 to 13, which consider the optimal allocation of CA, VRA and CA-VRA, respectively.

#### 4.2. Result analysis

Table II shows a summary of the results. For comparative purposes, the initial state (IS) of the network is indicated in the first row of the table. In all tests, the minimum voltage magnitude of the network for all load levels was greater than the permitted minimum value of 0,95 p.u, and power losses were lower than those in the IS. In Test 2 (CA), three switched capacitors were allocated, with a total investment cost of US\$ 65.294 (loss cost plus investment cost). In Test 3 (VRA), one voltage regulator of 200 A was allocated in branch 45-46, with a total investment cost of US\$ 76.646. In Test 4 (CA-VRA), one fixed capacitor, one switched capacitor, and one voltage regulator of 200 A were allocated, with a total investment cost of US\$ 60.627. In this case, the VR was allocated in branch 46-47. These first three tests showed better results than those reported in [1].

In Test 6 (CA), one fixed capacitor and two switched capacitors were allocated with a total investment cost of US\$ 52.773. In this case, power losses dropped sharply when compared to the initial case (Test 5 IS-DG1). In Test 7 (VRA), one voltage regulator of 200 A was allocated in branch 45-46, with a total investment cost of US\$ 71.452. In Test 8 (CA-VRA), the SGA did not allocate any VRs, and the algorithm found the same solution of Test 6. In Test 9 (CA-VRA-DGA), the solution did not include any DGs; the algorithm found the same solution of Test 4 due to the high investment cost of DGs. In Test 10 (IS-DGA), a single DG was allocated to bus 50. The active power injected for each load level is 1.000 kW for level 1 (heavy), 1.000 kW for level 2 (average), and 656,23 kW for level 3 (light). Note that the active power losses of this

system drastically decrease due to the presence of the DG unit. In Test 11 (CA), one switched capacitor was allocated with a total investment cost of US\$ 21.255. In Test 12 (VRA), one voltage regulator of 200 A was allocated in the branch 49-50, with a total investment cost of US\$ 55.838. In Test 13 (CA-VRA), the SGA did not allocate VRs, and the algorithm found the same results of Test 11.

Fig. 3 depicts the voltage profile of the IEEE 69-bus EDN for the tests performed. Only 10 out of the 13 tests are illustrated since results of Tests 8, 9, and 13 are the same as those in Tests 6, 4, and 11, respectively (see Table II). It can be observed in Fig. 3 that differences in voltages are relatively small in nodes near the substation for all tests. However, for nodes further away from the substation, voltages are much more different for each test. It can be noted that, for the initial state (IS) and Test 5 (which is shown here for comparative purposes with [1]), the voltages in nodes 62 to 66 are below 0,92 p.u. Nonetheless, the sole inclusion of DG (Test 10) raised the voltage in these nodes over 0,94. As expected, the best voltage profile in these nodes was obtained when VRs were allocated in the network (Test 12).

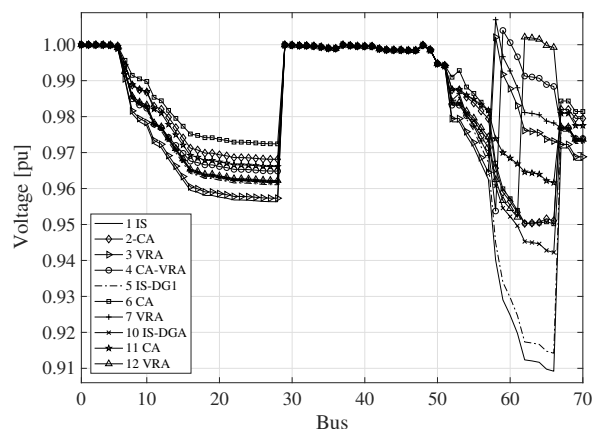


Figure 3. Voltage profile of the IEEE 69-bus EDN for maximum load level.

Figure 4 depicts power losses in different branches for Tests 1 to 4. For the sake of simplicity, only branches with power losses higher than 2 kW are illustrated. Also, only 4 tests are shown since power losses for other tests are similar to the ones already illustrated (see Table II). It can be seen that the optimal allocation of CAs and VRs reduces power losses, even though these elements do not provide active power to the EDN.

### 4.3. Result comparison

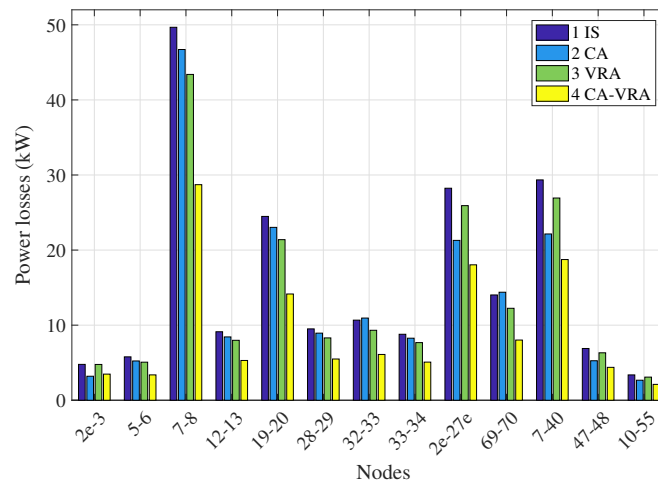
The results obtained with the SGA were compared with a hybrid method proposed in [2], a particle swarm optimization (PSO) method proposed in [36], and a Tabu Search metaheuristic proposed in [43]. This comparative study is shown in Table III. The bases of comparison are: 1) total investment cost, 2) loss cost, 3) investment cost of CAs, 4) optimal allocation of elements, 5) reactive power, 6) minimum voltage for each load level, and 7) capacitor type (fixed and/or switched). The results are sorted in descending order of their total investment cost. Note that the total investment cost found by the proposed SGA is lower than those reported in [43] and [36], and equal to the solution found in [2]. No further comparison is presented, since the aforementioned studies do not consider the joint allocation of CAs, VRs, and DGs, as proposed in this paper.

**Table II.** Results summary of the IEEE 69-bus EDN,

Test	Losses cost (US\$)	Inves. cost (US\$)	Installed power (kW or kVAR)			VR Taps			Power losses (kW)			Min. Voltage Mag. (p.u)			Time (sec)							
			Bus	Load level		Branch	Load		Load level			Load level										
				1	2		3	1	2	3	1	2	3									
1 IS	72.924	-	-	-	-	-	-	-	225,02	138,91	51,61	0,9092	0,9288	0,9567	-							
2 CA	52.394	12.900	11	600	600	300	-	-	-	204,76	93,79	34,41	0,9503	0,9503	0,9666	2,17						
			50	1.200	900	600	-	-	-													
			53	1.200	300	0	-	-	-													
3 VRA	66.646	10.000	-	-	-	-	45-46	6 5 4	201,55	127,31	48,25	0,9573	0,9661	0,9791	0,11							
			16	300	300	300	46-47	8 6 4	137,34	85,02	33,32	0,9538	0,9649	0,9789	2,47							
			50	900	900	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
4 CA-VRA	44.727	15.900	16	300	300	300	-	-	-	137,34	85,02	33,32	0,9538	0,9649	0,9789	2,47						
			50	900	900	600	-	-	-													
			53	900	300	0	-	-	-													
5 IS-DG1	67.307	-	41	-	-	-	-	-	207,25	128,21	47,77	0,9142	0,9327	0,9590	-							
6 CA	42.573	10.200	16	300	300	300	-	-	-	150,20	78,35	29,68	0,9502	0,9532	0,9690	2,55						
			50	1.200	900	600	-	-	-													
			53	900	300	0	-	-	-													
7 VRA	61.452	10.000	-	-	-	-	45-46	6 5 3	185,38	117,37	45,38	0,9620	0,9698	0,9813	0,04							
			16	300	300	300	-	-	-	150,20	78,35	29,68	0,9502	0,9532	0,9690	14,69						
			50	1.200	900	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
8 CA-VRA	42.573	10.200	53	900	300	0	-	-	-	137,34	85,02	33,32	0,9538	0,9649	0,9789	2,47						
			16	300	300	300	46-47	8 6 4	137,34								85,02	33,32	0,9538	0,9649	0,9789	2,47
			50	900	900	600	-	-	-								-	-	-	-	-	-
9 CA-VRA DGA	44.727	15.900	16	300	300	300	46-47	8 6 4	137,34	85,02	33,32	0,9538	0,9649	0,9789	2,47							
10 IS-DGA	48.208	100.000	50	-	-	-	-	-	149,14	90,83	34,48	0,9422	0,9606	0,9768	2,84							
11 CA	16.355	4.900	50	1.200	1.200	900	-	-	-	54,40	30,54	11,84	0,9616	0,9730	0,9842	0,41						
12 VRA	45.838	10.000	-	-	-	-	49-50	8 6 4	137,09	87,71	33,93	0,9520	0,9617	0,9763	0,02							
13 CA-VRA	16.355	4.900	50	1.200	1.200	900	-	-	-	54,40	30,54	11,84	0,9616	0,9730	0,9842	0,96						

**Table III.** Result summary of the IEEE 69-bus EDN (comparative study)

Method	Total invest. cost (US\$)	Loss cost (US\$)	invest. cost (US\$)
This work	2.475.401	2.466.515	14.100
Hybrid method [2]	2.475.401	2.466.515	14.100
Tabu Search [43]	2.582.876	2.571.876	11.000
PSO [36]	2.491.577	2.479.677	11.900



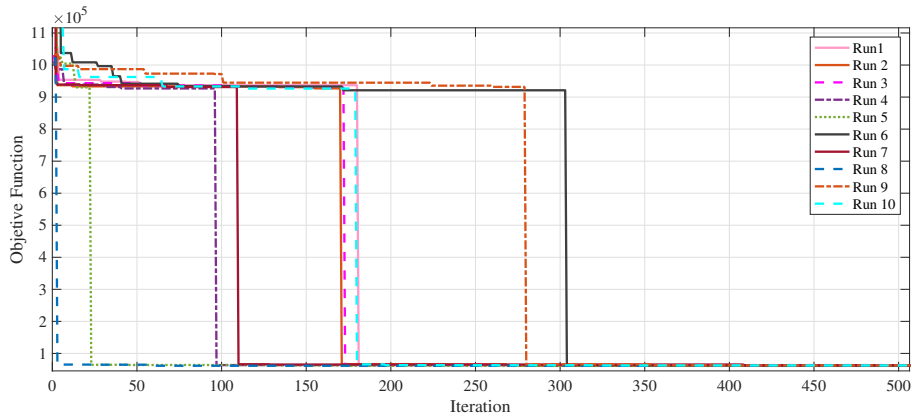
**Figure 4.** Power losses of the IEEE 69-bus EDN for maximum load level.

Table IV shows a comparative analysis of the investment proposals (cost and time) obtained in [1], and the ones found by the proposed SGA. In most of the tests, the proposed SGA was able to find better solutions than those reported in [1], and the computation time decreased drastically. For the test labeled as CA-VRA-DG1, the total investment cost of the SGA was slightly higher due to an increment in power losses resulting from the power flow. However, the solution found in these cases is the same as the one reported in [1] (the type of elements and location).

**Table IV.** Results and comparisons of investment proposals.

Proposal made in	69-bus				
	CA	VRA	CA-VRA	CA-VRA-DG1	
Cost (US\$)	This work	65.294	70.646	60.627	52.773
	MIPLM [1]	66.995	80.974	63.344	52.674
	Improvement (%)	-2,54	-12,75	-4,29	+0,18
Time	This work	2,27	0,15	4,55	14,69
	MIPLM [1]	6847	20	3570	11.174
	Improvement (%)	-99,97	-99,25	-99,87	-99,86

Fig. 5 illustrates the convergence of the SGA for different runs performed in Test 2. Note that the reproducibility of results is evident since the algorithm reached the same final value for all runs. Due to the diversity of solutions in the initial population, some runs took more iterations to converge. However, all of them reached the total cost (investment plus losses) reported by Test 2 in Table II.



**Figure 5.** Convergence of the SGA for different runs in Test 2 in the IEEE-69-bus EDN.

Fig. 6 depicts the allocation of DGs, VRs, and CAs resulting from Tests 2, 4, 6, and 11 for illustrative purposes. Note that not all of the devices are considered to be simultaneously allocated. Further details regarding the results of these tests can be consulted in Table II.

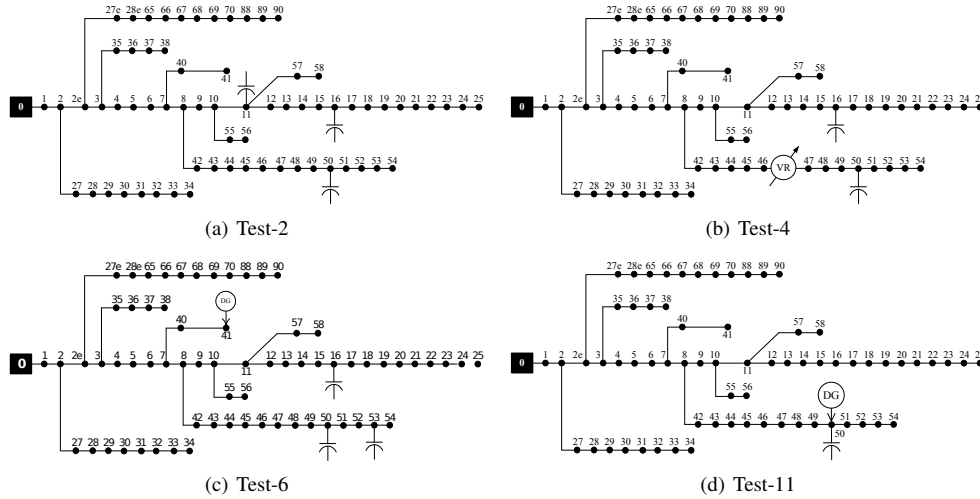


Figure 6. Optimal allocation of elements for different tests

## 5. Conclusions

This paper presented a mathematical model and a solution approach for the optimal allocation of capacitors, voltage regulators, and distributed generators in electric power distribution systems. The model can be used to optimize the allocation of all types of elements simultaneously, in pairs, or separately. The optimal placement of these elements was formulated as a MINLP problem and solved through a highly efficient metaheuristic. Furthermore, a full AC modeling to the network is considered, which provides more accurate solutions than linearization-based models.

Two stages were proposed to increase the efficiency of the proposed algorithm: local intensive search and quality improvement. Along with the fact that it was able to optimally allocate any of the devices previously mentioned, the main advantage of the proposed algorithm lies in its reduced computing time. This permits the use of the algorithm in real-size distribution systems. Also, the codification of DGs allows finding both the optimal sizing and the dispatch of DG units.

Several tests were designed for comparative purposes, considering different combination of elements to be allocated. Results on the IEEE 69-bus show the applicability and effectiveness of the proposed approach. The algorithm was able to find better solutions when compared with results previously reported in the specialized literature.

## Nomenclature

### Sets

$\Omega_b$	Set of buses
$\Omega_l$	Set of branches
$\Omega_d$	Set of load levels
$\Omega_r$	Set of voltage regulators
$\Omega_p$	Set of constrains outside permitted limits
$\Omega_g$	Set of distributed generators
$\Omega_s$	Set of switched capacitors
$\Omega_f$	Set of fixed capacitors

### Indices

$i, j$	Index of nodes
$l$	Index of branches
$d$	Index of load levels
$r$	Index of voltage regulators
$g$	Index of distributed generators

### Parameters:

$k_{cp}$	Capital recovery rate of capacitor constructions
$c_i^{fx}$	Annualized installation cost of fixed capacitors (US\$)
$c_{un}^{fx}$	Annualized unit cost of each standard fixed capacitor unit (US\$)
$c_i^{sw}$	Annualized installation cost of switched capacitors (US\$)
$c_{un}^{sw}$	Annualized unit cost of each standard switched capacitor unit (US\$)
$k_{vr}$	Capital recovery rate of voltage regulators constructions
$c_{ij,r}^{vr}$	Annualized installation cost of voltage regulator type $r$ (US\$)
$k_{dg}$	Capital recovery rate of generation constructions
$c_{i,g}^{dg}$	Annualized installation cost of distributed generation unit $g$ (US\$)
$c_{i,g,d}^{dg}$	Annualized operation cost of each discretization of distributed generation unit $g$ (US\$) in load level $d$
$k_{cp}$	Capital recovery rate of capacitor constructions
$c_i^{fx}$	Annualized installation cost of fixed capacitors (US\$)
$c_{un}^{fx}$	Annualized unit cost of each standard fixed capacitor unit (US\$)
$c_i^{sw}$	Annualized installation cost of switched capacitors (US\$)
$c_{un}^{sw}$	Annualized unit cost of each standard switched capacitor unit (US\$)

$k_{vr}$	Capital recovery rate of voltage regulators constructions
$c_{ij,r}^{vr}$	Annualized installation cost of voltage regulator type $r$ (US\$)
$k_{dg}$	Capital recovery rate of generation constructions
$c_{i,g}^{dg}$	Annualized installation cost of distributed generation unit $g$ (US\$)
$c_{i,g,d}^{dg}$	Annualized operation cost of each discretization of distributed generation unit $g$ (US\$) in load level $d$
$k_e$	Interest rate of the total cost of power losses
$c_d$	Energy cost in load level $d$ (US\$/kWh)
$T_d$	Number of hours of load level $d$ in one year (h)
$S_d$	Number of load level $d$ in one year
$R_{ij}$	Resistance of branch $ij$ ( $\Omega$ )
$X_{ij}$	Reactance of branch $ij$ ( $\Omega$ )
$Z_{ij}$	Impedance of branch $ij$ ( $\Omega$ )
$G_{ij}$	Conductance of branch $ij$ ( $\Omega$ )
$B_{ij}$	Susceptance of branch $ij$ ( $\Omega$ )
$B_{ij}^{sh}$	Shunt susceptance of branch $ij$ ( $\Omega$ )
$P_{i,d}^D$	Real power demand at node $i$ in load level $d$ (kW)
$Q_{i,d}^D$	Reactive power demand at node $i$ in load level $d$ (kVar)
$\overline{P}_i^S$	Maximum limit of active power provided by substation $S$ in node $i$ (kW)
$\underline{P}_i^S$	Minimum limit of active power provided by substation $S$ in node $i$ (kW)
$\overline{Q}_i^S$	Maximum limit of reactive power provided by substation $S$ in node $i$ (kVar)
$\underline{Q}_i^S$	Minimum limit of reactive power provided by substation $S$ in node $i$ (kVar)
$\overline{P}_i^{dg}$	Maximum limit of active power generated by distributed generator at bus $i$ (kW)
$\underline{P}_i^{dg}$	Minimum limit of active power generated by distributed generator at bus $i$ (kW)
$\overline{Q}_i^{dg}$	Maximum limit of reactive power generated by distributed generator at bus $i$ (kVar)
$\underline{Q}_i^{dg}$	Minimum limit of reactive power generated by distributed generator at bus $i$ (kVar)
$\overline{V}_j$	Maximum voltage magnitude at bus $j$ (kV)
$V_j^{reg}$	Voltage magnitude to be controlled at bus $j$ (kV)
$\overline{I}_{ij}$	Maximum current in branch $ij$ (A)
$\overline{n}^{fx}$	Maximum number of buses on which fixed capacitor units can be installed
$\overline{n}_i^{fx}$	Maximum number of fixed capacitor units that can be installed at bus $i$
$\overline{n}^{sw}$	Maximum number of buses on which switched capacitor units can be installed
$\overline{n}_i^{sw}$	Maximum number of switched capacitor units that can be installed at bus $i$
$\overline{n}^{vr}$	Maximum number of voltage regulators that can be installed in the network
$\overline{n}^{dg}$	Maximum number of distributed generators units that can be installed in the network
$\overline{n}_i^{dg}$	Maximum number of distributed generator units that can be installed at bus $i$
$k$	Counter of iterations
$m$	Counter of iterations without improvement in the objective function

$nb$	Number of buses in the network
$nd$	Number of load levels
$nl$	Number of branches in the network
$nt$	Total number of elements (CAs, VRs and DGs)
$k_{ps}$	Population size
$k_{sr}$	Selection rate
$k_{mr}$	Mutation rate (%)
$k_{max}$	Maximum number of iterations
$k_{of}$	Maximum number of iterations without improvement of the objective function
$\mu$	Penalization factor

### Variables:

$z$	Objective function (US\$)
$q_i^{fx}$	Binary variable that indicates the allocation of a fixed capacitor unit at node $i$
$n_i^{fx}$	Number of fixed capacitor units operating at node $i$
$q_i^{sw}$	Binary variable that indicates the allocation of a switched capacitor unit at node $i$
$n_i^{sw}$	Number of switched capacitor units operating at node $i$
$r_{ij,r}^{vr}$	Binary variable that indicates the allocation of a type $r$ voltage regulator in branch $ij$
$g_{i,d}^{dg}$	Binary variable that indicates the allocation of a type $g$ distributed generator unit at bus $i$
$n_{i,d}^{dg}$	Integer discretization of the power supplied by a DG unit at node $i$ in load level $d$
$I_{ij,d}$	Current flow magnitude of branch $ij$ in load level $d$ (A)
$V_{i,d}$	Voltage magnitude at node $i$ in load level $d$ (kV)
$P_{i,d}^S$	Real power provided by substation $i$ in load level $d$ (kW)
$P_{ij,d}$	Real power flow at branch $ij$ in load level $d$ (kW)
$P_{i,d}^{dg}$	Real power generated by distributed generator at bus $i$ for load level $d$ (kW)
$Q_{i,d}^S$	Reactive power provided by substation $i$ in load level $d$ (kVAr)
$Q_{ij,d}$	Reactive power flow at branch $ij$ in load level $d$ (kVAr)
$Q_{i,d}^{fx}$	Reactive power injected by fixed capacitor at bus $i$ for load level $d$ (kVAr)
$Q_{i,d}^{sw}$	Reactive power injected by switched capacitor at bus $i$ for load level $d$ (kVAr)
$Q_{i,d}^{dg}$	Reactive power generated by distributed generator at bus $i$ for load level $d$ (kVAr)
$\theta_{i,d}$	Phase angle of bus $i$ for load level $d$
$\theta_{ij,d}$	Difference of the phase angles of buses $i$ and $j$ for load level $d$
$V_{j,d}$	Regulated voltage magnitude at bus $i$ in load level $d$ (kV)
$\tilde{V}_{j,d}$	Non-regulated voltage magnitude at bus $i$ in load level $d$ (kV)
$tap_{ij,d}$	Integer step number of the voltage regulator tap on branch $ij$ in load level $d$
$a_{R_{ij,d}}$	Transformation ratio of voltage regulator



## References

- [1] J. F. Franco, M. J. Rider, M. Lavorato, and R. Romero, "A mixed-integer LP model for the optimal allocation of voltage regulators and capacitors in radial distribution systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 48, no. 1, pp. 123–130, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.11.027>. 335, 336, 337, 344, 345, 347
- [2] R. A. Gallego, A. J. Monticelli, and R. Romero, "Optimal capacitor placement in radial distribution networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 630–637, 2001, <https://doi.org/10.1109/59.962407>. 335, 336, 345, 346
- [3] W. H. Kersting, *Distribution System Modelling and Analysis*, crc press. ed., CRC Press, Ed., 2001, <https://doi.org/10.1201/9781420041736>. 335
- [4] M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, "Transmission system expansion planning by a branch-and-bound algorithm", *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 2, no. 1, pp. 90–99, 2008, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070090>. 335
- [5] S. Binato, M. Veiga, F. Pereira, and S. Granville, "A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 235–240, 2001, <https://doi.org/10.1109/59.918292>. 335
- [6] G. Levitin, A. Kalyuzhny, A. Shenkman, and M. Chertkov, "Optimal capacitor allocation in distribution systems using a genetic algorithm and a fast energy loss computation technique", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 623–628, 2000, <https://doi.org/10.1109/61.852995>. 336
- [7] M. Ayoubi, R. A. Hooshmand, and E. M. Torabian, "Optimal capacitor placement in distorted distribution systems considering resonance constraint using multi-swarm particle swarm optimisation algorithm", *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 11, no. 13, pp. 3210–3221, 2017, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0989>. 336, 337
- [8] H.S. Ramadan, A.F. Bendary, and S. Nagy, "Particle swarm optimization algorithm for capacitor allocation problem in distribution systems with wind turbine generators", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 84, pp. 143–152, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.04.041>. 336, 337
- [9] R. Sirjani, A. Mohamed, and H. Shareef, "Optimal capacitor placement in a radial distribution system using Harmony Search algorithm", *Journal of Applied Sciences*, vol. 10, no. 23, pp. 2998–3006, 2010, <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2998.3006>. 336, 337
- [10] C. F. Chang, "Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 1747–1755, 2008, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2002169>. 336, 337
- [11] R. Annaluru, S. Das, and A. Pahwa, "Multi-level ant colony algorithm for optimal placement of capacitors in distribution systems", *Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.04TH8753)*, vol. 2, pp. 1932–1937, 2004, <https://doi.org/10.1109/CEC.2004.1331132>. 336, 337
- [12] Y. Hsiao, C. Chen, and C. Chien, "Optimal capacitor placement in distribution systems using a combination fuzzy-GA method", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 26, n 7, pp. 501–508, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2004.01.002>. 336
- [13] A. A. El-Fergany, and A. Y. Abdelaziz, "Capacitor allocations in radial distribution networks using cuckoo search algorithm", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 8, no. 2, pp. 223–232, 2014, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0290>. 336, 337
- [14] S. J. Huang, "An immune-based optimization method to capacitor placement in a radial distribution system", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 744–749, 2000, <https://doi.org/10.1109/61.853014>. 336
- [15] S. Sultana and P. K. Roy, "Optimal capacitor placement in radial distribution systems using teaching learning based optimization", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 387–398, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.011>. 336, 337
- [16] S. Civanlar and J. Grainger, "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part I: The Overall Problem," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 11, pp. 3278–3283, 1985, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.318842>. 336, 337
- [17] S. Civanlar and J. J. Grainger, "Volt/var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators part II: The solution method", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*,

- vol. PAS-104, no. 11, pp. 3284–3290, 1985, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.318843>†. 336, 337
- [18] S. Civanlar and J. Grainger, “Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part III: The Numerical Results”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 11, pp. 3291–3297, 1985, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.318844>†. 336, 337
- [19] J. Sugimoto, R. Yokoyama, Y. Fukuyama, V. V. Silva, and H. Sasaki, “Coordinated allocation and control of voltage regulators based on reactive tabu search”, *2005 IEEE Russia Power Tech*, pp. 1–6, 2005, <https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524739>†. 336, 337
- [20] C. Guido, N. Christian, D. Proto, and P. Varilone, “Voltage regulators and capacitor placement in three-phase distribution systems with non-linear and unbalanced loads”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 7, no. 4, 2006, <https://doi.org/10.2202/1553-779X.1353>†. 336, 337
- [21] E. Pereira and L. Neves, “Allocation and integrated configuration of capacitor banks and voltage regulators considering multi-objective variables in smart grid distribution system”, in *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2010, Sao Paulo*, November, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2010.5740055>†. 336, 337
- [22] B. Alencar and A. Formiga, “Multiobjective optimization and fuzzy logic applied to planning of the volt/var problem in distributions systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 1274–1281, 2010, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2042734>†. 336, 337
- [23] I. Szuvovivski, T. S. P. Fernandes, and A. R. Aoki, “Simultaneous allocation of capacitors and voltage regulators at distribution networks using Genetic Algorithms and Optimal Power Flow”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 40, no. 1, pp. 62–69, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.02.006>†. 336, 337
- [24] N. Khalesi, N. Rezaei, and M.R. Haghifam, “DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 288 – 295, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.08.024>†. 336, 337
- [25] L. Ochoa and G. Harrison, “Minimizing energy losses: Optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 198–205, 2011, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2049036>†. 336, 337
- [26] M. Rider, J. Lopez-Lezama, J. Contreras, and A. Padilha-Feltrin, “Bilevel approach for optimal location and contract pricing of distributed generation in radial distribution systems using mixed-integer linear programming”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 7, no. 7, pp. 724–734, 2013, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0369>†. 336, 337
- [27] Q. Kang, T. Lan, Y. Yan, L. Wang, and Q. Wu, “Group search optimizer based optimal location and capacity of distributed generations”, *Neurocomputing*, vol. 78, no. 1, pp. 55-63, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.05.030>†. 336, 337
- [28] N. Yang and T. Chen, “Evaluation of maximum allowable capacity of distributed generations connected to a distribution grid by dual genetic algorithm”, *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 11, pp. 3044-3052, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.025>†. 336
- [29] F. Abu-Mouti and M. El-Hawary, “Optimal distributed generation allocation and sizing in distribution systems via artificial bee colony algorithm”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2090–2101, 2011, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2158246>†. 336, 337
- [30] M. Junjie, W. Yulong, and L. Yang, “Size and location of distributed generation in distribution system based on immune algorithm”, *Systems Engineering Procedia*, vol. 4, pp. 124 – 132, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.11.057>†. 336, 337
- [31] S. Saha and V. Mukherjee, “Optimal placement and sizing of dgs in rds using chaos embedded sos algorithm”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 14, pp. 3671–3680, 2016, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0151>†. 336, 337
- [32] A. F. Pérez, J. G. Villegas, and J. M. López-Lezama, “A Scatter Search Heuristic for the Optimal Location, Sizing and Contract Pricing of Distributed Generation in Electric Distribution Systems”, *Energies*, vol. 10, no. 10, pp. 1449, 2017, <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1449>†. 336
- [33] B.R. Pereira, G.R. Martins, J. Contreras, and J.R. Sanches, “Optimal distributed generation and reactive power allocation in electrical distribution systems”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 975–984, 2016, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2512819>†. 336
- [34] M. Pesaran, P.D. Huy, and V.K. Ramachandaramurthy, “A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75,

- pp. 293-312, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.071>†. 336
- [35] K. Suvarchala, T. Yuvaraj, and P. Balamurugan, “A brief review on optimal allocation of distributed generation in distribution network”, In *2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai*, pp. 391-396, February, 2018, <https://doi.org/10.1109/ICEES.2018.8443294>†. 336
- [36] S. P. Singh and A. R. Rao, “Optimal allocation of capacitors in distribution systems using particle swarm optimization”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 1267–1275, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.059>†. 337, 344, 345, 346
- [37] D.Q. Hung, N. Mithulananthan, and R.C. Bansal, “Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, , vol. 25, no. 3, pp. 814–820, 2010, <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2044414>†. 337
- [38] N. Acharya, P. Mahat, and N. Mithulananthan, “An analytical approach for DG allocation in primary distribution network”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 28, no. 10, pp. 669-678, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.02.013>†. 337
- [39] F. Rotaru, G. Chicco, G. Grigoras, and G. Cartina, “Two-stage distributed generation optimal sizing with clustering-based node selection”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 40, no. 1, pp. 120 – 129, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.02.012>†. 337
- [40] J. Tu, Y. Xu, and Z. Yin, “Data-Driven Kernel Extreme Learning Machine Method for the Location and Capacity Planning of Distributed Generation”, *Energies*, vol. 12, no. 1, p. 109, 2019, <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/1/109>†. 337
- [41] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, “A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 671–679, 1995, <https://doi.org/10.1109/59.387902>†. 342
- [42] M. E. Baran and F. F. Wu, “Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 735–743, 1989, <https://doi.org/10.1109/61.19266>†. 343
- [43] Y. Huang, H. Yang, and C.N Huang, “Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using Tabu Search approach”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 1868–1873, 1996, <https://doi.org/10.1109/59.544656>†. 345, 346

---

#### Luis Alfonso Gallego Pareja

He obtained his his B.Sc. and M.Sc. degrees from the Universidad Tecnología de Pereira, Colombia in 2003 and 2005, respectively. He also received his Ph.D. degree from the Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, Brazil in 2009. He is currently a full time professor at the Department of Electrical Engineering in the State University of Londrina, Paraná, Brazil.

---

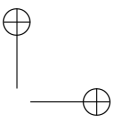
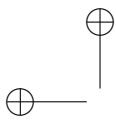
#### Jesús María López Lezama

He received his B.Sc. and M.Sc. degrees from the Universidad Nacional de Colombia in 2001 and 2006, respectively. He also received his Ph.D. degree at the Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, Brazil in 2011. He is currently an associate Professor at Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

---

#### Oscar Gómez Carmona

He received his B.Sc. and M.Sc. degrees from the Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia in 2003 and 2005, respectively. He also received his Ph.D. degree at the Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia in 2015. He is currently an an associate Professor at Universidad Tecnológica de Pereira, in Colombia.



Review

## The Sustainable Supply Chain: Concepts, Optimization and Simulation Models, and Trends

*La cadena de suministro sostenible: conceptos, modelos de optimización y de simulación y tendencias*

Janna Paola Gamboa Bernal<sup>\*</sup>,<sup>1</sup>, Javier Arturo Orjuela Castro<sup>ID</sup><sup>2</sup>,  
Carlos Eduardo Moreno Mantilla<sup>ID</sup><sup>3</sup>

<sup>1</sup> Cemex Colombia - Universidad Distrital Francisco José de Caldas, <sup>2</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas, <sup>3</sup>Universidad Nacional de Colombia

\*correspondence e-mail: jannapaola.gamboa@cemex.com

Received: 01-06-2020. Modified: 31-08-2020. Accepted: 15-09-2020

### Abstract

**Context:** The environmental and social dimensions of performance are of great importance, given that they must be incorporated into strategic, tactical, and operational objectives in companies and supply chains to minimize negative impacts on the environment and society.

**Method:** After reviewing the Scopus, Web of Science, and ScienceDirect databases for the topics of sustainability and supply chain management, a state of the art of green and sustainable supply chain management is presented, aiming to guide readers towards a synthesis of related concepts and future lines of research.

**Results:** The reader is introduced to concepts and trends around the field of green and sustainable supply chain management to raise interest in new research and practices to guide the implementation of sustainability in organizations and their supply chains.

**Conclusions:** Sustainable supply chain management still faces several academic and practical challenges in terms of implementation, performance measurement, and how models can capture a dynamic and uncertain social and environmental context. There are latent research issues such as management of the circular supply chain, applications in emerging economies, or the application of 4.0 technologies.

**Keywords:** Green supply chain management, modeling, sustainable performance, sustainable supply chain management, triple bottom line.

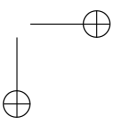
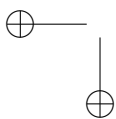
**Language:** English.

### Open access



© The authors; licensee: Revista INGENIERÍA. ISSN 0121-750X, E-ISSN 2344-8393.

Cite this paper as: J. P. Gamboa-Bernal, C. E. Moreno-Mantilla, and J. A. Orjuela-Castro, "Sustainable Supply Chains: Concepts, Optimization and Simulation Models, and Trends", *Ingeniería*, vol. 25, no. 3, pp. 355-377, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.16926>



### Resumen

**Contexto:** Las dimensiones ambiental y social del desempeño son de gran importancia, puesto que deben ser incorporadas a los objetivos estratégicos, tácticos y operativos de las empresas y cadenas de suministro para minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente y la sociedad.

**Método:** Tras haber consultado los temas de sostenibilidad y gestión de la cadena de suministro en las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect, se presenta el estado del arte en gestión de la cadena de suministro verde y sostenible, esperando guiar a los lectores hacia una síntesis de conceptos relacionados y futuras líneas de investigación.

**Resultados:** Se introduce al lector a conceptos y tendencias en el campo de gestión de la cadena de suministro verde y sostenible para despertar el interés en nuevas investigaciones y prácticas para guiar la implementación de la sostenibilidad en organizaciones y sus cadenas de suministro.

**Conclusiones:** La gestión sostenible de la cadena de suministro aún enfrenta varios retos académicos y prácticos, desafíos en términos de implementación, medición del desempeño y la manera en que los modelos pueden capturar un contexto social y ambiental dinámico e incierto. Hay cuestiones de investigación latentes como la gestión de la cadena de suministro circular, las aplicaciones en economías emergentes o la aplicación de tecnologías 4.0.

**Palabras clave:** Desempeño sostenible, gestión de la cadena de suministro sostenible, gestión de la cadena de suministro verde, modelamiento, sostenibilidad triple.

**Idioma:** Español

## 1. Introduction

Supply chain management (SCM) has acquired relevance in a global corporate and competitive environment [1]. Academia, industry, and government have looked for ways of jointly improving economic performance and systems sustainability [2]. One way of seeing this is that environmental and social issues are linked to industrial processes carried out in supply chains (SC). The challenge is to implement alternatives to the activities in SC, fostering significant changes in the economic, environmental, and social dimensions, thus allowing success in long-term development of SCs [3]. Hence, SCs are perceived as elements of economic systems embedded in social systems, which in turn, depend on ecological systems [4]. Consequently, it is necessary to make decisions considering sustainability as an important factor.

This article aims to guide readers through topics and current perspectives on Green Supply Chain Management (GSCM) and Sustainable Supply Chain Management (SSCM), given the emerging importance of these fields, with the purpose of motivating future research and applications on SC. We intend to achieve these objectives by addressing the following research questions: How is sustainability understood in supply chains? What concepts are related to it? What factors or motivations lead to opting for a sustainable supply chain (SSC)? Which optimization and simulation models have been used to model SSCs? What are the current trends that guide research in SSCM?

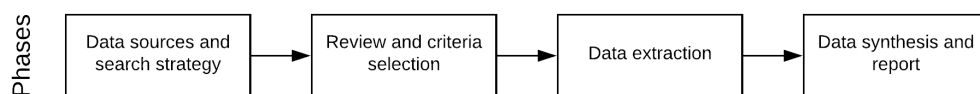
We expect to contribute to the SSCM field by bringing a conceptual basis for researchers who wish to embrace sustainability in SCs.

This article is supported by previous reviews and arguments in the literature. [5] was one of the first to tackle SCM from an ecological perspective, based on customer-supplier relationships and links to the internal dimensions of the organization. Later, [6] presented a conceptual SSCM framework focused on supplier management and SCM for sustainable products, highlighting the ecological and environmental issues as dominant within literature. As for the GSC, [7] made a review on the state of art, providing an integrative view on GSCM as a field of research. [8] reviewed the literature under several organizational theories with emphasis on GSCM practices. Similarly, [9] addressed more than 300 articles from 15 previous years about GSC and SSC, finding that 36 of them applied quantitative models, thus presenting research opportunities in 2013. In the same way, a year later, [10] presented a research on the application of formal models with social or environmental factors in SCs, including analytic models and lifecycle assessment. In the same field, circular economy started to gain relevance; [11] emphasized that not only should there be viable relationships between ecological systems and economic growth, but self-sustaining systems should also be created, comparing traditional systems with circular systems. In parallel, [4] presented, at the beginning of 2019, a review on modeling systems dynamics, where the quantitative model in the SSCM was highlighted and proposed a systemic approach to analyze complex and dynamic SCs.

To achieve the objective of the research, this article is organized as follows: the concepts found in the literature on supply chains and sustainability, GSCM, and SSCM are presented first; the article continues with the results found from applications via optimization modeling and simulation, followed by trends for future research; and it ends with a synthesis of the results and the conclusions of this review.

## 2. Materials and methods

To guide the literature review, this article is based on the methodology proposed by [12]. Such methodology consists of the following phases:



**Fig 1.** Methodology for literature reviews by Rincón-Ballesteros [12]

In the *data sources and search strategy* stage, two search formulas were used. Firstly, using “green”, “social”, “sustainability” AND “supply chain” on Scopus and ScienceDirect, 731 articles were found. This search was filtered according to the title, abstract, and keywords of papers within a timeframe from 2000 to 2020. It is worth noting that 22% of the articles were published in 2019.

The research journals with highest frequency of publication were: Journal of Cleaner Production, International Journal of Production Economics, Resources, Conservation and Recycling, and Computers & Industrial Engineering. The authors with more publications were Joseph Sarkis, Kannan Govindan, Behnam Fahimnia, K.W. Green, and Sachin K. Mangla.

Secondly, a search was queried on the Web of Science database with the equation “sustainable supply chain” AND “model” OR “simulation” for the title, abstract, and keywords, where 443 documents were found within a timeframe from 1997 to 2020. The research journals with more publication frequency were: Environmental Sciences, Green Sustainable Science Technology, Operations Research Management Science, Environmental Engineering, and Industrial Engineering.

During the *review and criteria selection*, the articles with the highest number of citations and relevance from each database were picked and analyzed first, so duplicates could be discarded. Finally, a review was made in terms of keywords, and the articles were classified into four categories: conceptual, review, mathematical model, or simulation. Around 120 articles were reviewed, and 89 were chosen for this article.

For the *data extraction* stage, the conceptual articles were analyzed considering their contributions, keywords, definitions, and conclusions. On the other hand, those articles related to modeling approaches were classified according to the information they presented: model type, objective, solution method, simulation paradigm, variables, parameters, links in the chain considered, and approach based on the pillars of sustainability. The tables containing these taxonomies can be reviewed in the appendixes.

The section pertaining to the last stage of this research, *data synthesis and report*, presents a synthesis of the results and an analysis of the SSC and GSC modeling articles. It also shows a synthesis graph that presents concepts and trends related to SCCM.

### 3. Results

From the literature review, a conceptualization was then derived to understand and encompass sustainability and supply chain issues.

#### 3.1. Towards a conceptual construction

J. A. Orjuela stated in his PhD thesis [13, p. 28] that a SC:

is composed by a series of suppliers, producers, manufacturers, traders and consumers, as well as by the integration of its provisioning, manufacturing, storing and distribution processes, and it involves abilities management for the on-time delivery of the products to the customers and consumers and also the usage of the technology needed to accomplish a continuous information exchange. The SC challenge is to deliver the right product to the right customer at the right time. Competitive pressure and global markets forced the companies to develop SC and thus, to give an answer to the client needs quickly, which creates more complexity.

The most widely used definition of ‘sustainability’ is the one given in 1987 by the World Commission on Environment and Development [14] as meeting the needs of the present generation without compromising the ability of future generations to meet theirs. In 1994, Elkington proposed the Triple Bottom Line (TBL), where he refers to organizational performance as the management of not only the economic capital, but also of the environmental and social capitals [1], [15]–[17].

[18] describe the three dimensions:

*Environmental dimension:* it has evolved from concerns about emissions from the source, dumping, and environmental waste, to later focus on the local environment considering the entire life cycle of the product. It currently focuses on the capacity of ecosystems to continue providing goods and services [19].

*Social dimension:* it includes corporate social responsibility, which involves ethical decision making in fields such as relationships with employees, community participation, and business management practices through education and talent development [20]. Other authors include practices such as health and security management systems, as well as the design of products and processes which positively impact the consumers and workers’ well-being. This also includes actions that contribute to the welfare of the community in which the SC operates [21].

*Economic dimension:* it consists of the total value improvement and cost reduction of the SC from a business management perspective, as well as of strategic and sustainable initiatives that push the company’s finances and marketing forward.

[1] states that SCs must adopt and prioritize sustainability while describing how sustainable supply chains can be implemented and managed. Furthermore, [17] argue that organizational sustainability initiatives are related to the evolution of business strategies in order to address social impacts.

The most cited definition for GSCM is given by [7, p. 54], who denotes it as “integrating environmental thinking into supply-chain management (SCM), including product design, material sourcing and selection, manufacturing processes, delivery of the final product to the consumers as well as end-of-life management of the product after its useful life”. This definition was mentioned in [22]–[24].

For [6, p. 1700], SSCM is defined it as “the management of material, information and capital flows as well as cooperation among companies along the SC while taking goals from all three dimensions of sustainable development, i.e., economic, environmental and social, into account which are derived from customer and stakeholder requirements”. This definition was retrieved from [23], [25]–[27].

For [28, p. 368], SSCM is “the strategic, transparent integration and achievement of an organization’s social, environmental, and economic goals in the systemic coordination of key interorganizational business processes for improving the long-term economic performance of the individual company and its SCs”. This definition was mentioned in [17], [29], [30].



[31, p. 339] used a total of 22 definitions for GSCM and 12 definitions for SSCM. It was defined as follows:

“The creation of coordinated supply chains through the voluntary integration of economic, environmental, and social considerations with key inter-organizational business systems designed to efficiently and effectively manage the material, information, and capital flows associated with the procurement, production, and distribution of products or services in order to meet stakeholder requirements and improve the profitability, competitiveness, and resilience of the organization over the short and long-term.”

Circular economy has become of great importance and has incorporated the concept of circular supply chain (CSC). [32, p. 884] defines CSCM as:

“the integration of circular thinking into the management of the supply chain and its surrounding industrial and natural ecosystems. It systematically restores technical materials and regenerates biological materials toward a zero-waste vision through system-wide innovation in business models and supply chain functions from product/service design to end-of-life and waste management, involving all stakeholders in a product/service.”

### 3.2. Management practices related to GSCM and SSCM

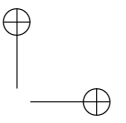
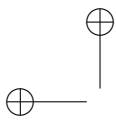
There are social and environmental practices of GSCM and SSCM. The former can be divided into two organizational categories: intra-organizational, which includes green manufacturing, green design, and internal environmental management; and inter-organizational, which includes green purchasing, collaboration with customers, inverse logistics, and investment recovery [33]–[36]. Each of these practices is described below:

- *Green design/eco-design*: it is the implementation of prevention strategies and source-oriented approaches on the product. It includes a reduction in the use of materials, more durability, combinations between production services, software updates, and manufacturing abilities [37], as well as minimizing the environmental footprint of several products in their lifecycle [38].

- *Green purchasing*: it is the conscious purchasing activity of materials and supplies that ensure the achievement of any established environmental goals [18].

- *Reverse logistics*: they are the process of planification, implementation, efficient flow control, use of affordable raw materials, in-process inventory, finished products, and information from the consumption point down to the origin point, aiming to regain the product's value at the end of its lifecycle for [39] its proper disposal or reuse, recycling, and remanufacturing [18], [40]. A topic related with the concept of reverse logistics is *Investment Recovery*. It implies to recover, display, and resell of surplus products, different materials (including scrap), and capital equipment when they are inactive and redundant [41].

- *ISO 14000/environmental management*: this label indicates that the company has implemented a management system that documents the aspects and effects of contamination resulting from the



company's activities, as well as identifying a process to prevent contamination and continuously improving with time [42].

- *Collaboration with customers and suppliers:* [41] stated that having a proximity with partners from the upstream and downstream SC, such as suppliers or customers, will facilitate an improvement in environmental performance. Several authors have researched the selection of 'green' suppliers. Their integration with the main suppliers and customers has been positively related to environmental collaboration [43].

- *Green manufacturing:* it can be defined as manufacturing practices which do not damage the environment during any of their stages [7]. It implies applying 'green' or ecological product design, the use of raw materials and their containers, and the distribution and reuse of the product at the end of its lifecycle. It diminishes the depletion of natural resources and reduces waste [44], [45].

When it comes to the social dimension, the difficulties in evaluating and defining it are recognized in literature [9], since it depends on the context and tends to change, in addition to the complexity of its measurement and quantification. [21] suggest the following concepts to cover this dimension of SCs:

- *Labour practices:* it includes equity, philanthropy, security, health and well-being, ethics, and human rights [46].

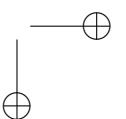
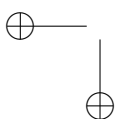
- *Product responsibility:* in 2000, the Global Reporting Initiative (GRI) defined practices such as health and security of customers, labeling of products and services, marketing communications, customer privacy, and regulatory compliance [21].

- *Community relationships:* it includes local actions such as purchasing from and developing local suppliers; helping with the construction of schools, educative centers for young people in order to generate employment, community centers, and drinking water facilities for the communities [47].

- *Socially responsible purchasing:* it is considering the positive consequences of organizational purchases or generating a positive social change through purchasing behavior [48].

### 3.3. SC performance measures

The metric and environmental indicators for sustainable development in SCs are focused on the measurement of recycled materials, product waste, water contamination,  $CO_2$  emissions, chemical substances, water and energy consumption, renewable energy, and environmental certifications [24]. [23] identified the most frequent indicators for GSCM and SSCM present in the literature: product characteristics, quality, recycling, solid waste, flexibility, environmental management systems, customers satisfaction, carbon footprint, lifecycle assessment, profitability, cost, consumption and use of energy, energetic efficiency, environmental costs, share of the market, reduction of air emissions, and greenhouse gas [18], [49].



The following indicators related to the economic and environmental dimensions have been defined: 1) atmospheric emissions; 2) solid waste; 3) consumption of dangerous and toxic materials; 4) inventory levels; 5) product quality; 6) capacity use; 7) operational costs; and 8) training costs [40]. From the social perspective: employee motivation, level of effort to raise the consumer's awareness about sustainability, customer and employee satisfaction, and number of conferences or exhibitions about sustainable development [18].

### 3.4. SC collaboration

[50, p. 4673] define collaboration as “a relational system in which two or more interested parties group the resources to accomplish objectives that none of them could accomplish individually”. The Handbook on the Sustainable Supply Chain (2019), chapter 6 presents the importance of collaboration and coordination between SC stakeholders, in order to achieve the objectives in terms of sustainability and accomplish effective product recycling policies.

[51] states that the most frequently used forms of collaboration contracts, information exchange, information technologies, and simultaneous decision-making. [52] evaluate logistic performance with the dynamic approach of systems when analyzing external integration mechanisms: contracts, vendor manage inventory (VMI), collaborative planning, collaborative planning forecasting and replenishment (CPFR), and information exchange.

Collaboration involves a joint and interactive process that results in activities and decisions emphasized the formalization of relationships [53]. In this way, companies aim to a competitive advantage through SC collaboration, and make the best from of the suppliers and customers resources and knowledge. This coordinates and integrates SC products and information flow [54]. [55] conclude that there is a growing group of researchers that is investigating the relationships between collaboration and sustainability, as well as the performance of the company in terms of economic, environmental, and social indicators.

### 3.5. GSCM and SSCM drivers

Due to the strategic pressures and motivations from various interested parties, companies are adopting GSCM in order to extend the environmental sustainability objectives to their suppliers [56], as well as to every person involved in the SC. The proper functioning of an SSC requires collaboration between its members [16], [26]. Applying sustainable business strategies worldwide can increase benefits through important gains in operational efficiency by reducing waste and global costs. This improves communities through an agreement on acceptable work conditions and compliance with regulations. It minimizes dependence on scarce environmental resources (water and raw materials) by guaranteeing long-term viability [20]. [56] claim that environmental sustainability can be used to differentiate the product and thus increase the value of the product.

[15] define exogenous and endogenous motivators for the SSCs. Among the former, we find environmental regulation, values and social norms, and market drivers. Strategy, culture, and resource base are, in turn, defined as endogenous motivators. Three topics were identified within the manufacturing firms which sum up the sustainability efforts: new manufacturing technology and

more sustainable processes; the development of ecological products; and the integration of best green practices. For their part, [30] mention the following as internal motivators: improving the capacities of the company's SSC to match with green clients; managing expectations and demand to achieve best business performance; and engaging green customers over competitors. As external motivators, government regulations, green clients demand, and community expectations are defined.

[22] identified the three main critical factors in the analysis for the implementation of GSCM: improved brand image, competitiveness of the company and economic benefits.

### 3.6. GSC and SSC modeling

[10] carry out a review on the GSSC quantitative model and classify them into 5 types: mathematical programming methods, simulation methods, heuristic methods, hybrid methods, and analytic models. In this article, an analysis is carried out on mathematical programming models and simulations.

[57] found that the main areas of publication are manufacturing, food, and electronics industry. Similarly, [58] reviewed the literature related to modeling and found that energy, electronics, and agriculture are the most referenced fields. Applications are found in different sectors: food SC [59]–[66] biofuel SC [67]–[71], fashion SC [24], [72], waste electrical and electronic equipment CS [73], [74].

In the field of mathematical programming, mathematical multi-objective programming models stand out by aiming to minimize the total costs and carbon emission [75]–[77], linear models [69], [78], non-linear [79], fractional [80], routing [81]. To have a better approach to reality, modeling a series of fuzzy [82], [83], and stochastic variables have been included [84]. Related to their functions and objectives with social factors, we found models that maximize the number of employees [78], evaluate suppliers [85], reduce workdays lost due to work accidents [83], and maximize food safety [86]. Similarly, [87] proposed multicriteria decision methods and structural equations modeling (SEM), aiming to maximize the total value of sustainable purchase performance and partial least squares SEM (PLS-SEM), which facilitate the development of sustainable SC practices and have an effect in competitive advantage [21]. Some solution methods used  $\varepsilon$  constraints to solve multi-objective models [78], [80], as well as using Pareto optimality [79], [86], GAMS software [85], [84], hybrid multi-objective approaches [81], and genetic algorithms [83], [77].

Regarding simulation models, [66] evaluate two scenarios where logistic costs, product quality, energy use, and  $CO_2$  emissions are compared. [88] also used simulation based on agents, seeking to minimize logistic costs along with the minimization of total costs and total carbon emissions. In system dynamics, [89] simulates Hubbert's peak, which considers the lifespan of coal deposits and evaluates their long-term sustainability. [90] analyze the robust closed loop SC operations and present relative strategies with robust  $H_\infty$  controlling methods. Through system dynamics, [91] evaluates the selection of sustainable suppliers and aims to ensure that suppliers maintain their status for a long period of time.

[52] simulate and study the use of multimodal transportation on the performance of the food supply logistics of uchuva SCs through the system dynamics approach. They consider transportation costs, total transportation time, food loss due to transportation and inventory, and  $CO_2$  emissions caused by mode of transportation. [92] simulate and evaluate sustainability in a closed supply chain, considering customer satisfaction and impact and the green image factor as an environmental factor. [93] use simulation based on GIS (Geographic Information Systems) to evaluate electric demand and supply at the neighborhood level through discrete simulation, seeking to reduce the negative impact on customers satisfaction levels, as well as the way to optimize routes and compare several solutions in terms of truck fleets to reduce  $CO_2$  emissions. [94] explore the possibilities of applying the reengineering process available with RFID in closed cycle SCs, and [95], also using discrete simulation, analyze the consequences of risk in terms delay/disturbance using the Monte Carlo Simulation.

Among the environments, we can highlight well-known software such as STELLA [89], VENSIM [92], [91], iThink [52], and ARENA [94]. There are also specialized environments like ALADIN [66] y PROSIM [96].

We found 19 articles about modeling with environmental and economic actors, 9 of which include the three pillars: social, environmental and, economic. However, none of them had a solely socio-economic or social-environmental focus. [97] did not find either any model that considered only the social environmental aspect; but they found 3 articles that considered the socio-economic aspect. Similarly, [10] found 28 articles with the three pillars, 61 with environmental-economic, 2 with social-economic, and 1 with social-environmental approaches.

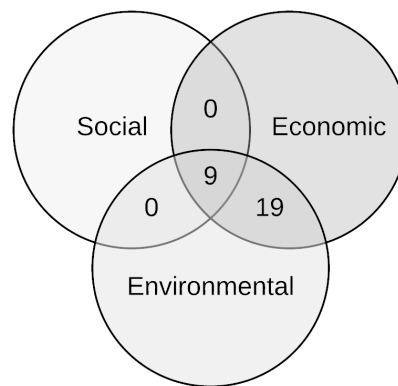


Fig 2. Sustainability approaches in modeling according to the reviewed articles

#### 4. Trends and future investigations

There is a bias in terms of the number of articles dealing exclusively with research on the environmental impact of SCs. Thus, there is a need to evaluate the three sustainability pillars to

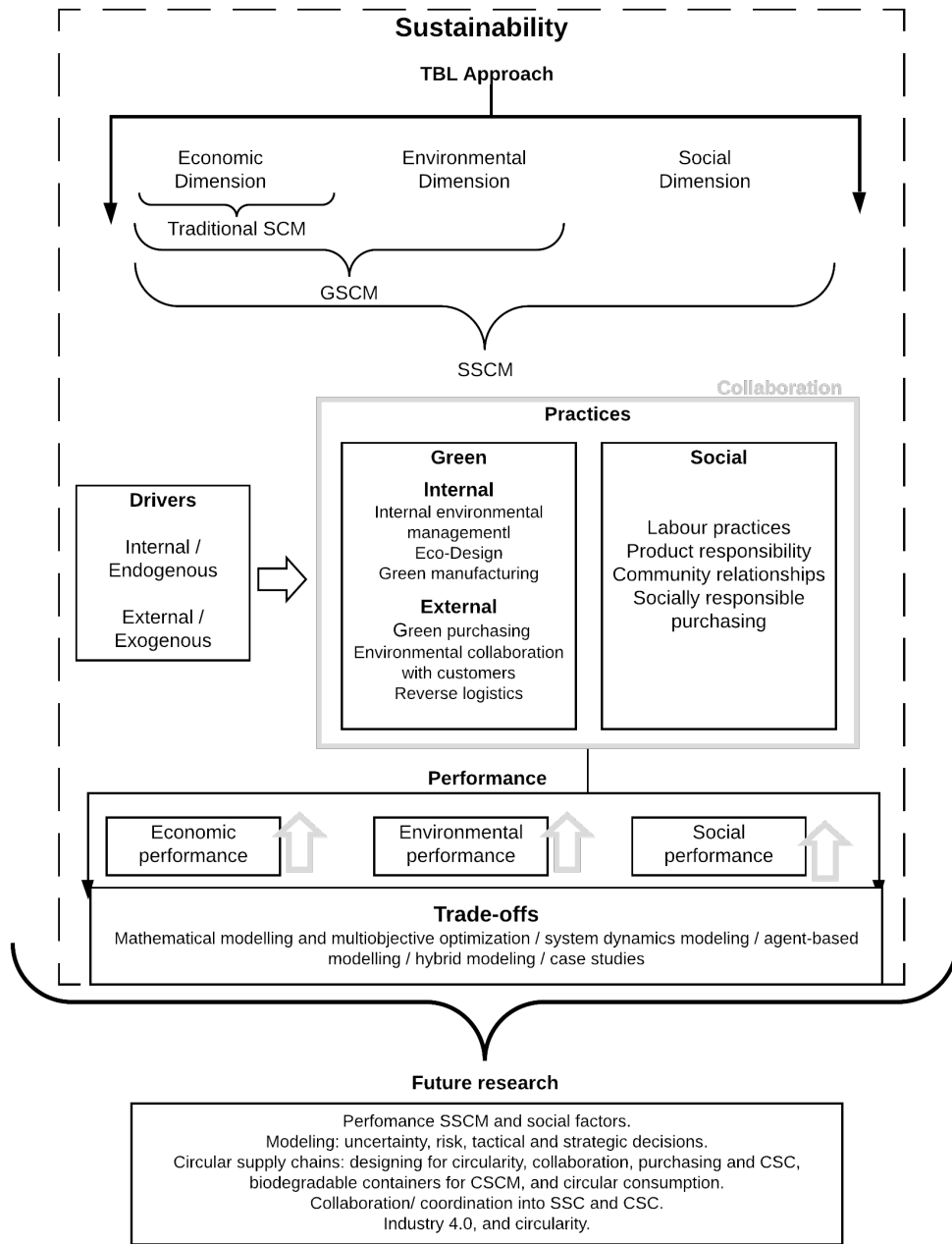


Fig 3. Synthesis of results

understand the interrelationship between the social, economic, and environmental dimensions [9]. Moreover, the analysis should be expanded beyond greenhouse gas emissions to encompass lifecycle approaches that include new social measures [81], [86].

A series of important contributions to the analysis of SC performance in terms of sustainability and the importance of its three pillars in decision-making strategies using quantitative models have been observed [87]. In the same way, the need to carry out theoretical and empirical research about the way forward to fulfill the SCS has been stated [97].

Furthermore, it is important to develop models that consider uncertainty and risk [81], since most models are deterministic, and complexity has not yet been modeled by including environmental and social factors [86]. Also, it is recommended to integrate tactical and strategic decisions into the models [97]. Moreover, it is required to analyze SC design with different structures and configurations to evaluate the pillars of sustainability [75], [97].

Additionally, the potential for collaboration is seen as a competitive advantage [55]. In this sense, there is growing number of research groups investigating the relationships between collaboration in terms of sustainability and company performance based on economic, environmental, and social indicators [55], with quantitative methods being an opportunity for research on the relationship between sustainability and collaboration.

There is increasing interest in emerging economies [1], [98], [47], circular economy [99], [100], along with circular supply chains [32], [11], [101] and the use of 4.0 technologies in this context [102]. Therefore, future research should be oriented towards topics such as designing for circularity, collaboration, and coordination into CSCM (Circular Supply Chain Management), purchasing and CSC, biodegradable containers for CSCM, and circular consumption.

In Fig. 3, there is a synthesis of the findings of the literature review. Firstly, we found, from the sustainability perspective, how the TBL offers an approach from the 3 dimensions or pillars which has been covered in by literature in traditional SCM, GSCM, and SSCM, with external and internal motivators that drive the manufacturing structure and include sustainable objectives. In the same way, these motivators drive the deployment of social and green SC practices, where it is important to highlight collaboration to involve the parties and to have an impact in SC development. In addition, trade-off are found in the decision-making process within the context of SCs and sustainability, an approach that has raised interest among researchers.

## 5. Conclusions

From the literature review, we can highlight the fact that the concept of sustainability has gained great relevance in all directions, incorporating itself into the supply chain with its three dimensions, which, beyond economic benefits, are oriented toward the importance of SC actors to contribute positively to the environment and society.

There has been a growing interest in SC research during the last 19 years, particularly in 2019, which witnessed a great interest from scholars in Green and Sustainable Supply Chain Management. It should be noted that SSCM is an extension of GSCM [31], and it includes the 3 dimensions of sustainability, which comes from a bigger understanding of social and environmental aspects.

The relevance of GSCM and SSCM is based upon both internal and external supply chain drivers, which are generated due to pressure from stakeholders and motivated from the benefits that could be gained when sustainable requirements are accomplished. Likewise, these motivators drive the deployment of operational practices containing a series of social and environmental factors that influence the performance of SCs. Therefore, it is possible to find different indicators in the literature to measure environmental impact. However, several authors mention the need for improving the quantifying of social impacts.

Additionally, the literature review shows that collaboration within the SC is a primary factor, as it has positive impacts in sustainable objectives, thus contributing to achieve the aforementioned practices mentioned and improving performance. It is worth delving into the current characteristics required by SC actors, defining indicators to monitor compliance with the principles of sustainability, as well as achieving economic, environmental and social development, the latter being the least referenced in SCM.

When it comes to the modeling and simulation of GSC and SSC, we observed that, in the last decade, scholars have increasingly participated in the modeling of environmental and social factors, which are still a challenge in terms of definition and measurement. In the same way, some authors conclude that there is a need to incorporate risk management and uncertainty into the formal modeling of strategic and tactical decisions, as well as implementing mixed models that allow approaching to the current SC issues.

Thereupon, we can observe that quantitative methods and their distinct applications in different industrial areas are a current research topic. Additionally, circular economy recently merged with this field, given its perceived importance as an alternative to transform productive systems with defined principles and strategies with the objective of being environmentally viable, valuing waste, and optimizing the use of raw materials. Moreover, its implementation requires the participation of all the actors in supply chain and beyond, which is something that we have previously learned about the operation of green and sustainable supply chains. Finally, the incorporation of technology and Industry 4.0 into the fields of sustainable supply chains and circular economy brings research opportunities that open up one of the most promising lines of development for the literature and applied work in the coming years.



## 6. First appendix

### A review of SSCM optimization models in the literature

**Table I.** A review of SSCM optimization models in the extant literature Multi Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO), Multi-objective Hybrid Approach, Multiple Criteria Decision Making (MCDM), Adapted multi-objective variable neighborhood search (AMOVNS), Structural equation modeling (SEM)

Authors	Model type/technique	Solution Method	Model Objective	Approach
[79]	MINLP	Pareto Optimal	Maximization of the net present value (NPV) and the minimization of the environmental impact.	Economic Environmental
[67]	RM / RNA / DS	Approximation to zero Mean Square Error	Predicting future behavior within Panela cane production, taking into account use of the land, contamination, food security, price of bioethanol.	Social Economic Environmental
[87]	ANP	MCDM	Determining design requirements effective in achieving sustainable CS.	Social Economic Environmental
[84]	MO- MINLP stochastic	GAMS	Maximize total benefits provided by product sales minus installation, investment, logistics, and disposal costs.	Economic Environmental
[78]	MO- MILP	$\epsilon - constraint$	Minimizing total costs; measuring the life cycle greenhouse gas emissions and the number of accrued local jobs.	Social Economic Environmental
[103]	MO-MIP	Accelerated Benders decomposition algorithm (BDA)	Minimizing total cost, minimizing environmental impact, and maximizing social responsibility.	Social Economic Environmental
[80]	MILFP	$\epsilon - constraint$	Minimizing cost and environmental impact	Economic Environmental
[77]	MO	GA (NSGA-II, MOGA-II, HYBRID)	Minimizing $CO_2$ emissions from transportation and total costs in the distribution chain.	Economic Environmental
[69]	MILP	GAMS	Minimizing total cost of the chain throughout a planning horizon of the supply network of biodiesel production.	Economic Environmental
[81]	2E-LRPTW	MHPV (MOPSO-AMOVNS)	Supply Chain Network design and optimizing economic and environmental objectives in a perishable food SC.	Economic Environmental

Authors	Model type/technique	Solution Method	Model Objective	Approach
[82]	SEM, Fuzzy AHP (FAHP), Fuzzy MOLP	SEM	Minimizing purchasing, production and delivery cost; and improving perform logistics activities across economic, environmental, and social dimensions.	Economic Environmental
[85]	DEA	GAMS Technique alpha	Sustainable supplier performance evaluation and selection.	Social Economic Environmental
[76]	MO	GA (MOGA-II)	Minimization of the sum of carbon emission, maximizing the 'greening' effect, and minimization of the sum of costs associated with product distribution.	Economic Environmental
[39]	MO	MHPV (MOPSO AMOVNS)	Minimizing total costs and environmental effect.	Economic Environmental
[104]	MIC MAC	-	Analysis to test a framework SCCM drivers and their relationships.	Social Economic Environmental
[83]	Fuzzy MO	GA	Total profit optimization, reduction of lost working days due to occupational accidents, maximizing responsiveness to customer demand.	Social Economic Environmental
[86]	MO	Pareto Optimal	Minimizing total cost, impact on food security, and emissions of greenhouse gases.	Social Economic Environmental

## 7. Second appendix

### Selected articles dealing with simulation in GSCM and SSCM studies

Table II. Selected articles dealing with simulation in GSCM and SSCM studies

Authors	Simulation paradigm	Simulation environment	Model Objective	Approach
[89]	System dynamics simulation	STELLA	Simulating Hubbert's Peak, particularly for the Chinese raw coal production.	Economic Environmental
[66]	Agent-based simulation	ALADIN (Agro-Logistic Analysis and Design INstrument)	Two scenarios are evaluated. Logistics costs, deterioration of product quality, energy use, and CO <sub>2</sub> emissions are compared.	Economic Environmental

Authors	Simulation paradigm	Simulation environment	Model Objective	Approach
[90]	System dynamics simulation	LMI Toolbox of MATLAB	Analyzing robust operations in closed-loop supply chains and bring forward relative strategies with robust $H_{\infty}$ control methods.	Economic Environmental
[96]	Discrete event simulation	PROSIM, Pharmaceutical Retail Organization using SIMulation	Reducing the negative impact on the customers' satisfaction level (technical sustainability), optimizing the routes followed by each transportation vector (technical, economic, and environmental sustainability), as well as comparing in terms of truck fleets in order to reduce $CO_2$ emissions (environmental and economic sustainability).	Social Economic Environmental
[88]	Optimization and Agent-based simulation		Solving the supply chain management problem (logistic costs), minimization of total cost and environmental impact.	Economic Environmental
[93]	GIS-based simulation		Assessing electricity demand and supply at the neighborhood level.	Economic Environmental
[94]	Discrete event simulation	ARENA	Exploring the possibilities to apply RFID-enabled reengineering in closed loop supply chain design.	Economic Environmental
[95]	Discrete event simulation	Monte Carlo	Operational GSC risk evaluation and management by capturing of uncertainty and evaluating risks by means of simulation to demonstrate the delay/disturbance consequences of the risk. Case example of an Indian poly plastic manufacturing company.	Economic Environmental
[91]	System dynamics simulation	VENSIM	Selecting sustainable suppliers and ensuring that suppliers maintain their performance for a long period of time.	Economic Environmental
[92]	System dynamics simulation	VENSIM PLE	Evaluating the system behavior of an electrical manufacturing company as a case of study; simulating a closed-loop supply chain, in consideration of customer satisfaction and Green Image Factor.	Economic Environmental

Authors	Simulation paradigm	Simulation environment	Model Objective	Approach
[52]	System dynamics simulation	IThINK	Studying the impact of using multimodal transport over the logistics performance of an uchuva food supply, using indicators like transportation costs, total time of transport, food loss due transport and inventory, CO <sub>2</sub> emissions.	Economic Environmental

## References

- [1] B. S. Silvestre, “Sustainable supply chain management in emerging economies: Environmental turbulence, institutional voids and sustainability trajectories”, *International Journal of Production Economics*, vol. 167, pp. 156–169, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.05.025> 356, 359, 366
- [2] A. Diabat, T. Abdallah, A. Al-Refai, D. Svetinovic, and K. Govindan, “Strategic closed-loop facility location problem with carbon market trading”, *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 60, no. 2, pp. 398–408, 2013. <https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2211105> 356
- [3] S. Luthra, K. Govindan, D. Kannan, S. K. Mangla, and C. P. Garg, “An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 140, pp. 1686–1698, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.078> 356
- [4] T. Rebs, M. Brandenburg, and S. Seuring, “System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 208, pp. 1265–1280, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.100> 356, 357
- [5] J. Sarkis, “Supply Chain Management and Environmentally Conscious Design and Manufacturing”, *International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing*, vol. 4, pp. 43–52, 1995. [Online] Available; [https://www.researchgate.net/publication/259261058\\_Supply\\_Chain\\_Management\\_and\\_Environmentally\\_Conscious\\_Design\\_and\\_Manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/259261058_Supply_Chain_Management_and_Environmentally_Conscious_Design_and_Manufacturing)] 357
- [6] S. Seuring, and M. Müller, “From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, no. 15, pp. 1699–1710, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020> 357, 359
- [7] S. K. Srivastava, “Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review”, *International Journal of Management Reviews*, vol. 9, no. 1, pp. 53–80, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x> 357, 359, 361
- [8] J. Sarkis, Q. Zhu, and K. H. Lai, “An organizational theoretic review of green supply chain management literature”, *International Journal of Production Economics*, vol. 130, no. 1, pp. 1–15, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.11.010> 357
- [9] S. Seuring, “A review of modeling approaches for sustainable supply chain management”, *Computers and Industrial Engineering*, vol. 66, no. 3, pp. 533–540, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053> 357, 361, 366
- [10] M. Brandenburg, K. Govindan, J. Sarkis, and S. Seuring, “Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions”, *European Journal of Operational Research*, vol. 233, no. 2, pp. 299–312, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032> 357, 363, 364
- [11] A. Genovese, A. A. Acquaye, A. Figueroa, and S. C. Koh, “Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications”, *Omega*, vol. 66, pp. 344–357, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.015> 357, 366
- [12] D. L. Rincón Ballesteros, J. E. Fonseca Ramírez, and J. A. Orjuela-Castro, “Hacia un Marco Conceptual Común sobre Trazabilidad en la Cadena de Suministro de Alimentos”, *Ingeniería*, vol. 22, no. 2, pp. 161, 2017. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.2.a01> 357

- [13] J. A. Orjuela, "Incidencia del diseño de la cadena de suministro alimentaria en el equilibrio de flujos logísticos", Ph.D. thesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., 2018. [Online] Available; <http://bdigital.unal.edu.co/69976/> 358
- [14] U. Nations., Report of the World Commission on Environment and Development Our Common Future United Nations, 1987. [Online] Available; <http://www.ask-force.org/web/Sustainability/Brundtland-Our-Common-Future-1987-2008.pdf> 359
- [15] S. Schrettle, A. Hinz, M. Scherrer-Rathje, and T. Friedli, "Turning sustainability into action: Explaining firms' sustainability efforts and their impact on firm performance", *International Journal of Production Economics*, vol. 147, pp. 73–84, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.02.030> 359, 362
- [16] B. S. Silvestre, "A hard nut to crack! Implementing supply chain sustainability in an emerging economy", *Journal of Cleaner Production*, vol. 96, pp. 171–181, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.009> 359, 362
- [17] A. Touboulic, D. Chicksand, and H. Walker, "Managing Imbalanced Supply Chain Relationships for Sustainability: A Power Perspective", *Decision Sciences*, vol. 45, no. 4, pp. 577–619, 2014. <https://doi.org/10.1111/dec.12087> 359
- [18] N. Kafa, Y. Hani, and A. El Mhamedi, "Sustainability performance measurement for green supply chain management", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 6, 2013. <https://doi.org/10.3182/20130911-3-BR-3021.00050> 359, 360, 361, 362
- [19] B. Bakshi, *Sustainable Engineering: Principles and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. <https://doi.org/10.1017/9781108333726> 359
- [20] D. J. Closs, C. Speier, and N. Meacham, "Sustainability to support end-to-end value chains: The role of supply chain management", *Journal of the Academy of Marketing Science*, vol. 39, no. 1, pp. 101–116, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11747-010-0207-4> 359, 362
- [21] J. R. Chacón, C. E. Moreno, and A. B. L. de Sousa, "Enablers of sustainable supply chain management and its effect on competitive advantage in the Colombian context", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 139, pp. 237–250, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.018> 359, 361, 363
- [22] S. Luthra, D. Garg, and A. Haleem, "An analysis of interactions among critical success factors to implement green supply chain management towards sustainability: An Indian perspective", *Resources Policy*, vol. 46, pp. 37–50, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.12.006> 359, 363
- [23] P. Ahi, and C. Searcy, "An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains", *Journal of Cleaner Production*, vol. 86, pp. 360–377, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.018> 359, 361
- [24] F. Caniato, M. Caridi, L. Crippa, and A. Moretto, "Environmental sustainability in fashion supply chains: An exploratory case based research", *International Journal of Production Economics*, vol. 135, no. 2, pp. 659–670, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.06.001> 359, 361, 363
- [25] I. Erol, S. Sencer, and R. Sari, "A new fuzzy multi-criteria framework for measuring sustainability performance of a supply chain", *Ecological Economics*, vol. 70, no. 6, pp. 1088–1100, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.01.001> 359
- [26] D. R. Maditati, Z. H. Munim, H. J. Schramm, and S. Kummer, "A review of green supply chain management: From bibliometric analysis to a conceptual framework and future research directions", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 139, pp. 150–162, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.004> 359, 362
- [27] M. Mahdiloo, R. F. Saen, and K. H. Lee, "Technical, environmental and eco-efficiency measurement for supplier selection: An extension and application of data envelopment analysis", *International Journal of Production Economics*, vol. 168, pp. 279–289, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.07.010> 359
- [28] C. R. Carter, and D. S. Rogers, "A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory", *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 38, no. 5, pp. 360–387, 2008. <https://doi.org/10.1108/09600030810882816> 359
- [29] A. Ashby, M. Leat, and M. Hudson-Smith, "Making connections: a review of supply chain management and sustainability literature", *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 17, no. 5, pp. 497–516, 2012. <https://doi.org/10.1108/13598541211258573> 359
- [30] S. Liu, D. Kasturiratne, and J. Moizer, "A hub-and-spoke model for multi-dimensional integration of green marketing and sustainable supply chain management", *Industrial Marketing Management*, vol. 41, no. 4, pp. 581–588, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indmarman.2012.04.005> 359, 363

- [31] P. Ahi, and C. Searcy, “A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 52, pp. 329–341, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.018> 360, 367
- [32] M. Farooque, A. Zhang, M. Thürer, T. Qu, and D. Huisingh, “Circular supply chain management: A definition and structured literature review”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 228, pp. 882–900, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.303> 360, 366
- [33] K. W. Green, P. J. Zelbst, J. Meacham, and V. S. Bhadauria, “Green supply chain management practices: Impact on performance”, *Supply Chain Management*, vol. 17, no. 3, pp. 290–305, 2012. <https://doi.org/10.1108/13598541211227126> 360
- [34] Q. Zhu, and J. Sarkis, “Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises”, *Journal of Operations Management*, vol. 22, no. 3, pp. 265–289, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2004.01.005> 360
- [35] Q. Zhu, and J. Sarkis, “The moderating effects of institutional pressures on emergent green supply chain practices and performance”, *International Journal of Production Research*, vol. 45, no. 18–19, pp. 4333–4355, 2007. <https://doi.org/10.1080/00207540701440345> 360
- [36] M. Zhang, Y. K. Tse, B. Doherty, S. Li, and P. Akhtar, “Sustainable supply chain management: Confirmation of a higher-order model”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 128, pp. 206–221, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.015> 360
- [37] M. L. Tseng, A. S. F. Chiu, R. R. Tan, and A. B. Siriban-Manalang, “Sustainable consumption and production for Asia: Sustainability through green design and practice”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 40, pp. 1–5, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.015> 360
- [38] T. K. Eltayeb, S. Zailani, and T. Ramayah, “Green supply chain initiatives among certified companies in Malaysia and environmental sustainability: Investigating the outcomes”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, no. 5, pp. 495–506, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.003> 360
- [39] G. Kannan, S. Azevedo, H. Carvalho, and V. Cruz-Machado, “Impact of supply chain management practices on sustainability”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 85, pp. 212–225, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.068> 360, 369
- [40] S. G. Azevedo, H. Carvalho, S. Duarte, and V. Cruz-Machado, “Influence of Green and Lean Upstream Supply Chain Management Practices on Business Sustainability”, *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 59, no. 4, pp. 753–765, 2012. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6179327/> 360, 362
- [41] P. Y. Foo, V. H. Lee, G. W. H. Tan, and K. B. Ooi, “A gateway to realising sustainability performance via green supply chain management practices: A PLS–ANN approach”, *Expert Systems with Applications*, vol. 107, pp. 1–14, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.013> 360, 361
- [42] N. Darnall, G. J. Jolley, and R. Handfield, “Environmental management systems and green supply chain management: Complements for sustainability?”, *Business Strategy and the Environment*, vol. 17, no. 1, pp. 30–45, 2008. <https://doi.org/10.1002/bse.557> 361
- [43] S. Vachon, and R. D. Klassen, “Extending green practices across the supply chain: The impact of upstream and downstream integration”, *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 26, no. 7, pp. 795–821, 2006. <https://doi.org/10.1108/01443570610672248> 361
- [44] M. A. Rehman, D. Seth, and R. Shrivastava, “Impact of green manufacturing practices on organisational performance in Indian context: An empirical study”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 427–448, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.106> 361
- [45] C. Blome, A. Paulraj, and K. Schuetz, “Supply chain collaboration and sustainability: A profile deviation analysis”, *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 34, no. 5, pp. 639–663, 2014. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-11-2012-0515> 361
- [46] V. Mani, R. Agarwal, A. Gunasekaran, T. Papadopoulos, R. Dubey, and S. J. Childe, “Social sustainability in the supply chain: Construct development and measurement validation”, *Ecological Indicators*, vol. 71, pp. 270–279, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.007> 361
- [47] V. Mani, A. Gunasekaran, and C. Delgado, “Enhancing supply chain performance through supplier social sustainability: An emerging economy perspective”, *International Journal of Production Economics*, vol. 195, pp. 259–272, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.025> 361, 366
- [48] C. Leire, and O. Mont, “The implementation of socially responsible purchasing”, *Corporate Social Responsibility*

- ity and Environmental Management, vol. 17, no. 1, pp. 27–39, 2010. <https://doi.org/10.1002/csr.198> 361
- [49] P. Ahi, C. Searcy, and M. Y. Jaber, “Energy-related performance measures employed in sustainable supply chains: A bibliometric analysis”, *Sustainable Production and Consumption*, vol. 7, pp. 1–15, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2016.02.001> 361
- [50] F. T. Chan, and A. Prakash, “Inventory management in a lateral collaborative manufacturing supply chain: A simulation study”, *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 16, pp. 4670–4685, 2012. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.628709> 362
- [51] H. Allaoui, Y. Guo, and J. Sarkis, “Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 229, pp. 761–774, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.367> 362
- [52] J. A. Orjuela-Castro, A. L. Caicedo-Otavo, A. F. Ruiz-Moreno, and W. Adarme-Jaimes, “External integration mechanisms effect on the logistics performance of fruit supply chains. A dynamic system approach”, *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 10, no. 2, pp. 311–322, 2016. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.5073> 362, 364, 371
- [53] M. Hudnurkar, and U. Rathod, “Collaborative supply chain: Insights from simulation”, *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, vol. 3, no. 2, pp. 122–144, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13198-012-0114-9> 362
- [54] M. Cao, M. A. Vonderembse, Q. Zhang, and T. Ragu-Nathan, “Supply chain collaboration: conceptualisation and instrument development”, *International Journal of Production Research*, vol. 48, no. 22, pp. 6613–6635, 2010. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207540903349039> 362
- [55] L. Chen, X. Zhao, O. Tang, L. Price, S. Zhang, and W. Zhu, “Supply chain collaboration for sustainability: A literature review and future research agenda”, *International Journal of Production Economics*, vol. 194, pp. 73–87, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.04.005> 362, 366
- [56] S. Laari, J. Töyli, and L. Ojala, “Supply chain perspective on competitive strategies and green supply chain management strategies”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 141, pp. 1303–1315, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.114> 362
- [57] Z. N. Ansari, and R. Kant, “A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 2524–2543, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.023> 363
- [58] M. Brandenburg, and T. Rebs, “Sustainable supply chain management: A modelling perspective”, *Annals of Operations Research*, vol. 229, no. 1, pp. 213–252, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-015-1853-1> 363
- [59] K. Vasileiou, and J. Morris, “The sustainability of the supply chain for fresh potatoes in Britain”, *Supply Chain Management*, vol. 11, no. 4, pp. 317–327, 2006. <https://doi.org/10.1108/13598540610671761> 363
- [60] S. Sim, M. Barry, R. Clift, and S. J. Cowell, “The relative importance of transport in determining an appropriate sustainability strategy for food sourcing. A case study of fresh produce supply chains”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 12, no. 6, pp. 422–431, 2007. <https://doi.org/10.1065/lca2006.07.259> 363
- [61] J. Hamprecht, D. Corsten, M. Noll, and E. Meier, “Controlling the sustainability of food supply chains”, *Supply Chain Management*, vol. 10, no. 1, pp. 7–10, 2005. <https://doi.org/10.1108/13598540510578315> 363
- [62] R. K. Apaiah, A. R. Linnemann, and H. J. Van Der Kooi, “Exergy analysis: A tool to study the sustainability of food supply chains”, *Food Research International*, vol. 39, no. 1, pp. 1–11, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.04.006> 363
- [63] P. Newton, A. Agrawal, and L. Wollenberg, “Enhancing the sustainability of commodity supply chains in tropical forest and agricultural landscapes”, *Global Environmental Change*, vol. 23, no. 6, pp. 1761–1772, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.08.004> 363
- [64] A. Del Borghi, M. Gallo, C. Strazza, and M. Del Borghi, “An evaluation of environmental sustainability in the food industry through Life Cycle Assessment: The case study of tomato products supply chain”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 78, pp. 121–130, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.083> 363
- [65] G. Egilmez, M. Kucukvar, O. Tatari, and M. K. S. Bhutta, “Supply chain sustainability assessment of the U.S.

- food manufacturing sectors: A life cycle-based frontier approach”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 82, pp. 8–20, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.008> 363
- [66] J. G. Van Der Vorst, S. O. Tromp, and D. J. Van Der Zee, “Simulation modelling for food supply chain redesign; Integrated decision making on product quality, sustainability and logistics”, *International Journal of Production Research*, vol. 47, no. 23, pp. 6611–6631, 2009. <https://doi.org/10.1080/00207540802356747> 363, 364, 369
- [67] J. A. Orjuela, I. Huertas, J. Figueroa, D. Kalenatic, and K. Kadena, “Potential production bioethanol from the Panela Cane: dynamics between pollution, food safety and land use”, *Ingeniería*, , no. 1, pp. 6–26. <https://doi.org/10.14483/23448393.3689> 363, 368
- [68] I. Awudu, and J. Zhang, “Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1359–1368, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.016> 363
- [69] J. A. Aranda, M. J. Barón , I. Huertas , and J. A. Orjuela, “Mathematical Programming Model of Biodiesel Supply Chain in Colombia”, *Ingeniería*, vol. 19, no. 1, pp. 19–49, 2014. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2014.1.a02> 363, 368
- [70] J. A. Aranda, and J. A. Orjuela, “Multiobjective optimization in biofuel supply chain management. A review of the literature”, *Ingeniería*, vol. 20, no. 1, pp. 2–3, 2015. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a03> 363
- [71] T. M. Mata, A. A. Martins, S. K. Sikdar, and C. A. Costa, “Sustainability considerations of biodiesel based on supply chain analysis”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 13, no. 5, pp. 655–671, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0346-9> 363
- [72] R. Mahmoudi, and M. Rasti-Barzoki, “Sustainable supply chains under government intervention with a real-world case study: An evolutionary game theoretic approach”, *Computers and Industrial Engineering*, vol. 116, pp. 130–143, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.028> 363
- [73] P. Georgiadis, and M. Besiou, “Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A System Dynamics approach”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, no. 15, pp. 1665–1678, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.019> 363
- [74] P. Georgiadis, and M. Besiou, “Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: A system dynamics analysis”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, pp. 475–493, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2362-7> 363
- [75] K. Govindan, A. Jafarian, and V. Nourbakhsh, “Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic”, *Computers and Operations Research*, vol. 62, pp. 112–130, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.12.014> 363, 366
- [76] S. Validi, A. Bhattacharya, and P. J. Byrne, “A solution method for a two-layer sustainable supply chain distribution model”, *Computers and Operations Research*, vol. 54, pp. 204–217, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.015> 363, 369
- [77] S. Validi, A. Bhattacharya, and P. J. Byrne, “A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system - A multi-objective approach”, *International Journal of Production Economics*, vol. 152, pp. 71–87, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.003> 363, 368
- [78] F. You, L. Tao, D. J. Graziano, and S. W. Snyder, “Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis”, *AIChE Journal*, vol. 58, no. 4, pp. 1157–1180, 2012. <https://doi.org/10.1002/aic.12637> 363, 368
- [79] G. Guillén-Gosálbez, and I. E. Grossmann, “Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty”, *AIChE Journal*, vol. 55, no. 1, pp. 99–121, 2009. <https://doi.org/10.1002/aic.11662> 363, 368
- [80] D. Yue, M. Kim, and F. You, “Design of Sustainable Product Systems and Supply Chains with Life Cycle Optimization based on Functional Unit: General Modeling Framework, MINLP Algorithms”, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 1, pp. 1003–1014, 2013. <https://doi.org/10.1021/sc400080x> 363, 368
- [81] K. Govindan, A. Jafarian, R. Khodaverdi, and K. Devika, “Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food”, *International Journal of Production Economics*, vol. 152, pp. 9–28, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028> 363, 366, 368



- [82] S. K. Jakhar, "Performance evaluation and a flow allocation decision model for a sustainable supply chain of an apparel industry", *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, no. 1, pp. 391–413, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.089> 363, 369
- [83] H. Soleimani, K. Govindan, H. Saghafi, and H. Jafari, "Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design", *Computers and Industrial Engineering*, vol. 109, pp. 191–203, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.038> 363, 369
- [84] G. Corsano, A. R. Vecchiotti, and J. M. Montagna, "Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 35, no. 8, pp. 1384–1398, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.01.008> 363, 368
- [85] M. Azadi, M. Jafarian, R. F. Saen, and S. M. Mirhedayatian, "A new fuzzy DEA model for evaluation of efficiency and effectiveness of suppliers in sustainable supply chain management context", *Computers and Operations Research*, vol. 54, pp. 274–285, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.03.002> 363, 369
- [86] J. A. Orjuela-Castro, J. A. Aranda-Pinilla, and C. E. Moreno-Mantilla, "Identifying trade-offs between sustainability dimensions in the supply chain of biodiesel in Colombia", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 161, pp. 162–169, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.009> 363, 366, 369
- [87] G. Büyükoçkan, and Ç. Berkol, "Designing a sustainable supply chain using an integrated analytic network process and goal programming approach in quality function deployment", *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 11, pp. 13731–13748, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.171> 363, 366, 368
- [88] N. Sahay, and M. Ierapetritou, "Supply chain management using an optimization driven simulation approach", *AIChE Journal*, vol. 59, no. 12, pp. 4612–4626, 2013. <http://doi.wiley.com/10.1002/aic.14226> 363, 370
- [89] Z. Tao, and M. Li, "What is the limit of Chinese coal supplies-A STELLA model of Hubbert Peak", *Energy Policy*, vol. 35, no. 6, pp. 3145–3154, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.11.011> 363, 364, 369
- [90] X. Y. Huang, N. N. Yan, and R. Z. Qiu, "Dynamic models of closed-loop supply chain and robust  $H_{\infty}$  control strategies", *International Journal of Production Research*, vol. 47, no. 9, pp. 2279–2300, 2009. <https://doi.org/10.1080/00207540701636355> 363, 370
- [91] I. J. Orji, and S. Wei, "An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection: A case on manufacturing industry", *Computers and Industrial Engineering*, vol. 88, pp. 1–12, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2015.06.019> 363, 364, 370
- [92] S. R. Golroudbary, and S. M. Zahraee, "System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain", *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 53, pp. 88–102, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2015.02.001> 364, 370
- [93] J. W. Eising, T. van Onna, and F. Alkemade, "Towards smart grids: Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains", *Applied Energy*, vol. 123, no. 2014, pp. 448–455, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.017> 364, 370
- [94] A. Kumar, and S. Rahman, "RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore", *Journal of Cleaner Production*, vol. 85, pp. 382–394, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.037> 364, 370
- [95] S. K. Mangla, P. Kumar, and M. K. Barua, "Monte Carlo simulation based approach to manage risks in operational networks in green supply chain", *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 2186–2194, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.462> 364, 370
- [96] F. Longo, "Sustainable supply chain design: An application example in local business retail", *Simulation*, vol. 88, no. 12, pp. 1484–1498, 2012. <https://doi.org/10.1177/0037549712458983> 364, 370
- [97] M. Eskandarpour, P. Dejax, J. Miemczyk, and O. Péton, "Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review", *Omega*, vol. 54, pp. 11–32, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006> 364, 366
- [98] V. Mani, and A. Gunasekaran, "Four forces of supply chain social sustainability adoption in emerging economies", *International Journal of Production Economics*, vol. 199, pp. 150–161, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.015> 366
- [99] Y. Kalmykova, M. Sadagopan, and L. Rosado, "Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, pp. 190–201, 2018.

- <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034> 366
- [100] M. A. Moktadir, T. Rahman, M. H. Rahman, S. M. Ali, and S. K. Paul, “Drivers to sustainable manufacturing practices and circular economy: A perspective of leather industries in Bangladesh”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 174, pp. 1366–1380, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.063> 366
- [101] M. H. A. Nasir, A. Genovese, A. A. Acquaye, S. C. Koh, and F. Yamoah, “Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry”, *International Journal of Production Economics*, vol. 183, pp. 443–457, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.008> 366
- [102] R. Sharma, C. J. C. Jabbour, and A. B. Lopes de Sousa Jabbour, “Sustainable manufacturing and industry 4.0: what we know and what we don’t”, *Journal of Enterprise Information Management*, . <https://doi.org/10.1108/JEIM-01-2020-0024> 366
- [103] M. S. Pishvae, J. Razmi, and S. A. Torabi, “An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supply chain”, *Transportation Research*, vol. 67, pp. 14–38, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.04.001> 368
- [104] S. J. Childe, S. F. Wamba, A. Gunasekaran, R. Dubey, K. Shbin, and T. Papadopoulos, “Sustainable supply chain management: framework and further research directions”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 1119–1130, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.117> 369

---

#### **Janna Paola Gamboa Bernal**

Master’s student in Productive and Logistics Systems at Universidad Distrital Francisco José de Caldas in Bogotá, Colombia. Logistic coordinator, Logistics & Supply Chain at Cemex Colombia. Industrial Engineer from Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Researcher in Supply Chains, Logistics, and Traceability, GICALyT.

E-mail: jannapaola.gamboa@cemex.com, jpgamboab@correo.udistrital.edu.co

---

#### **Javier Arturo Orjuela Castro**

Food Engineer, Industrial Engineer, and specialist in Production Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Master in Operations Research and Statistics, Universidad Tecnológica de Pereira Colombia. PhD in Engineering, Industry and Organizations, Universidad Nacional de Colombia. Professor and Researcher in Logistics, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Research Group Leader in Supply Chains, Logistics, and Traceability, GICALyT.

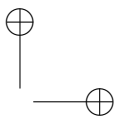
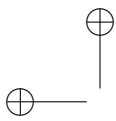
E-mail: jorjuela@udistrital.edu.co

---

#### **Carlos Eduardo Moreno Mantilla**

Associate Professor, Department of Systems and Industrial Engineering at Universidad Nacional de Colombia in Bogotá. PhD in Environmental Policy from the College of Environmental Science and Forestry at State University of New York (SUNY-ESF) and Syracuse University, United States of America (2004). Specialist in Environmental Engineering (1999) and Bachelor in Industrial Engineering (1995) from Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. He currently conducts research in areas such as sustainable supply chain management and circular economy.

E-mail: cemorenom@unal.edu.co



Research

REVISTA  
Ingeniería

## Analysis, Design, and Multi-physics Simulation of a Terahertz Photoconductive Antenna Using the Finite Element Method

*Análisis, diseño y simulación multifísica de una antena*

*Fotoconductor Terahertz usando el método de elementos finitos*

**Diana González Galindo**<sup>\*1</sup>, **Cristhian Torres Urrea**<sup>1</sup>, **Óscar Corredor Camargo**<sup>1</sup>, **David Suárez Mora**<sup>1</sup>, **Carlos Criollo Paredes**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Cooperativa de Colombia. Bogotá-Colombia, <sup>2</sup> Universidad Centro de Estudios Superiores María Goretti. Pasto-Colombia.

\*Correspondence e-mail: oscar.corredor@campusucc.edu.co

Recibido: 01/06/2020. Modificado: 31/08/2020. Aceptado: 15/09/2020.

### Abstract

**Context:** The study of nanotechnology has shown great advances, which include research and exploration of the TeraHertz (THz) region, where one of the most common approaches is the use of photoconductive antennas (PCA) due to the intrinsic properties of their emission the non-destructive nature of this type of radiation.

**Method:** This paper describes the concept of antenna its radiation principles, the mathematical foundations, the material used for radiation, and the adjustment of the parameters to find a result of the pulse in THz by using the finite element method, accessible in the COMSOL Multiphysics software.

**Results:** The result of a computational modeling is presented, which studies the behavior of a PCA, where the input of the chosen model corresponds to the geometry and material of the antenna, thus showing the concentration of the electric field in the GAP zone of the dipole and the substrate of the semiconductor.

**Conclusions:** Given the theoretical foundations that describe the behavior of PCAs in THz, it was possible to configure parameters such as the geometry of the antenna, the laser to be used, and the construction materials to achieve the generation of a photocurrent peak in the order of 0,1-1,2 THz.

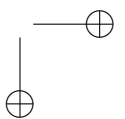
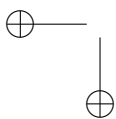
**Keywords:** COMSOL Multiphysics, different geometry, high-frequency structure, terahertz antenna.

**Language:** English

Open access



Cite this paper as: D. González, C. Torres, O. Corredor, D. Suárez, C. Criollo "Analysis, Design, and Multi-physics Simulation of a Terahertz Photoconductive Antenna Using the Finite Element Method", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 378-392 (2020). © The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.16931>



### Resumen

**Contexto:** El estudio de la nanotecnología ha mostrado grandes avances que incluyen la investigación y exploración de la región Terahertz (THz), donde uno de los enfoques más comunes es el uso de antenas fotoconductoras (PCA) debido a las propiedades intrínsecas de su emisión y a la naturaleza no destructiva de este tipo de radiación.

**Método:** Este artículo describe el concepto de antena, sus principios de radiación, los fundamentos matemáticos, el material utilizado para la radiación y el ajuste de los parámetros para encontrar un resultado del pulso en THz mediante el uso del método de elementos finitos, accesible en el software COMSOL Multiphysics.

**Resultados:** Se presenta el resultado de un modelado computacional que estudia el comportamiento de una PCA, donde la entrada del modelo escogido corresponde a la geometría y al material de la antena, mostrando así la concentración del campo eléctrico en la zona GAP del dipolo y del sustrato del semiconductor.

**Conclusiones:** Dados los fundamentos teóricos que describen el comportamiento de las PCA en THz, fue posible configurar parámetros como la geometría de la antena, el láser a usar y los materiales de construcción para lograr la generación de un pico de fotocorriente en el orden de 0,1-1,2 THz.

**Palabras clave:** COMSOL Multiphysics, geometrías diferentes, estructura de alta frecuencia, antena de terahercios.

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

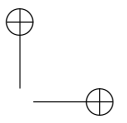
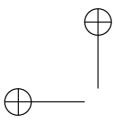
Terahertz photoconductive antennas (PCA) have been rapidly growing as a research field during the last year, due to the vast spectrum of configurations for each of their building parameters. The main research trend has been to optimize their configuration. In this field, each parameter has been investigated independently, so the real challenge appears when all parameters are interacting simultaneously. In this study, we modeled all parameters at the same time to know which configuration yields the best results according the pulse and power of the signal.

A PCA antenna was simulated to improve its power efficiency. To achieve this goal, the COMSOL Multiphysics software was used, in which the Maxwell wave equation for optical interaction, the Poisson equations, and the derivative derivative diffusion of the electrical response were combined to determine a numerical solution.

The paper is organized as follows: section 2 introduces the theory and concept behind the proposed THz-PCA design, as well as defining the computational domain and methodology; section 3 contains a brief state of art; section 4 presents the validation of the model with both computational and experimental work from the literature, and it shows the results of the proposed THz-PCA design with other designs from previous studies; and section 5 summarizes and concludes and presents the conclusions of this research.

## 2. Background

In recent years, it has been determined that the interaction between the different properties of matter produces Terahertz radiation. These signals are significantly useful due to the size of the



devices that produce them, as well as their frequency and power. The field of telecommunications has shown that the need to generate high-frequency signals involves the challenge of building larger active equipment, which is why most of the infrastructure occupies large spaces, which limits the spectrum of applications. Therefore, the generation of Terahertz radiation from small devices offers a wide variety of potential applications in the fields of health, safety, and images, among others.

Now, the interaction between different materials and techniques in this context has been a matter of research. There are two ways to generate THz radiation: by means of solid and optical state methods, the latter of which was used in this article.

An advantage of the use of the optical state technique is that it can be implemented at room temperature. Optical state techniques can be classified into optical rectification and generation with photoconductive materials, the latter being more efficient when using laser oscillators [1].

Thus, PCAs have emerged as conventional devices to emit THz radiation from the excitation of an oscillator laser, which has evolved over the years into powerful laser systems generally based on titanium-sapphire alloys [2].

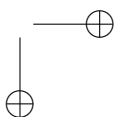
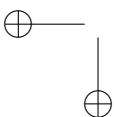
## 2.1. Antenna

A PCA consists of an excitation laser that impinges on a surface in time lapses of the order of femtoseconds (fs). The surface, manufactured with photoconductive material, receives a constant electric potential to polarize the flow of electrons. Two metallic planar electrodes are on the photoconductive material, which can be a semiconductor substrate such as semi-isolated gallium arsenide (SI-GaAs). It is separated by an area with a defined shape, which is the geometry of the antenna, one of the parameters that were modified through modeling in this article.

The substance with which the antenna is manufactured, also called substrate, must comply with picosecond life times for the carriers, which means high mobility and high inverse breaking voltage for the flow of electrons generated in the voltage source connected to the antenna [3].

The attenuation in this type of radiation is very high, which is why it is necessary to use high-power sources to propagate the pulse in the air. The use of this type of sources has increased the price of this technology, thus hindering its implementation in small laboratories. Some studies have reported radiation levels of up to 60 THz [4]. However, the efficiency of these antennas is 0,1 % by default, with an excitation of the lasers of 1-8 mW.

On the other hand, the signal-to-noise ratio and the dynamic range based on photoconductive antennas at the THz frequency is based on the quality and performance of the emitter, specifically on the amount of output power. As mentioned above, the power of the antenna depends on the source of voltage supplied to the system, which implies a high power consumption and a difficulty dissipating the heat produced during this process.



This scenario reveals the need to investigate the requirements for efficiency, as well as to identify topologies and optimal excitation parameters.

The potential applications of these devices have also required the use of different types of substrate, electrode geometry, polarization voltages, and different optical powers, reporting different efficiencies for each case.

Following this line of research, this article seeks to determine the parameters of photoconductive antennas through simulation techniques in order to improve their efficiency. The typical configuration of this concept can be seen in Fig. 1.

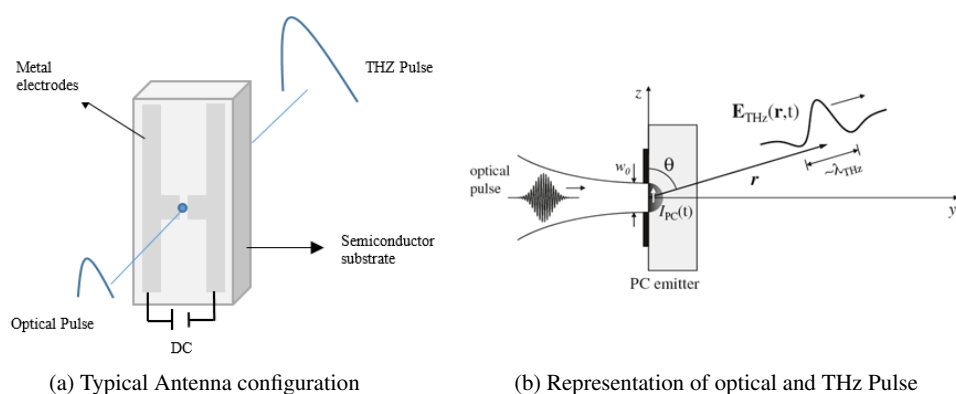


Figure 1. THz radiation generation diagram [5]

## 2.2. Principles of radiation

Electromagnetic radiation is in the frequency range of approximately 0,1-10 THz. This is between the frequencies of radio waves and those of infrared light. As the wavelengths are in the range of 0,03-1 mm and often below 1 mm, THz radiation is also sometimes called sub-millimeter radiation.

PCAs take advantage of the increase in conductivity when exposed to light, but their behavior is the opposite in the absence of light. Photoconductivity is produced due to the increasing numbers of electron carriers and gaps generated by photons. This happens during the picoseconds of needed to generate a pulse in the terahertz frequency [6]. Normally, this kind of pulses are called ultra-short pulses, which can be generated by an extremely short laser. The maximum duration of the pulse is dozens of peak-seconds, and the frequency is in the range of femtoseconds. This range can be extended using non-linear frequency conversion techniques [1]. The mobility of the carriers increases the efficiency of the emission of the signal in the THz frequency because the carriers can accelerate more quickly.

An important characteristic of semiconductors that should be considered in this type of applications is that the carriers must have a short life time; given the fact that being faster, they will generate shorter THz pulses and, therefore, a greater bandwidth in spectral terms [7].

### 2.3. Math

Each of the construction parameters of the antenna has a physical behavior, which is a mathematical expression that allows obtaining the simulation results. In this section, the equations that describe the meters of the antenna will be explained.

The Poisson equation allows describing the steady state in any part of the semiconductor in the electrostatic field.

$$\nabla \cdot (\nabla \phi(\vec{r})) = \frac{q}{\epsilon} (n_0(\vec{r}) - p_0(\vec{r}) - C(\vec{r})) \quad (1)$$

The Poisson equation in the time domain is as follows:

$$\epsilon_0 \nabla \cdot (\epsilon_T \nabla V) = q(n - p - N_D + N_A) \quad (2)$$

The steady-state solution provides the initial distribution of carriers and currents into the electrodes. The heterogeneous carrier mobilities in the semiconductor can also be found using this equation.

Electromagnetic waves are modeled in the frequency domain, when the effective wavelength is comparable with the sizes of the resonant and radiating structures, in this case, the antenna. The following expression raises the equation of the electromagnetic wave in terms of frequency.

$$\nabla \cdot \mu_r^{-1} (\nabla \cdot \vec{E}) - k_0^2 \left( \epsilon_r - \frac{j\lambda\sigma}{2\pi c\epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (3)$$

The optical excitation process leads the atoms of the active medium to their excited state, thus causing a population inversion. The mathematical modeling of this effect can be evaluated by means of the following expression:

$$\vec{E}_{inc} = \vec{a} E_0 \exp \left( 2 \ln(0,5) \frac{(x - x_0)^2}{D_x^2} \right) \quad (4)$$

The field produced by the flow of electrons through the electrodes is modeled mathematically as follows:

$$E_0 = \sqrt{\frac{P_{ave} 8 \eta_0}{f_p D_x D_y D_t} \left( \frac{-\ln(0,5)}{\pi} \right)^{\frac{3}{4}}} \quad (5)$$

Furthermore, the following expressions describe power flow in the different axes:

$$P_{0x}(x, y, z, ) = \frac{1}{2\hat{\eta}} \operatorname{Re}(|E_y|^2 - |E_z|^2) \quad (6)$$

$$P_{0y}(x, y, z, ) = \frac{1}{2\hat{\eta}} \operatorname{Re}(|E_x|^2 - |E_z|^2) \quad (7)$$

$$P_{0z}(x, y, z, ) = \frac{1}{2\hat{\eta}} \operatorname{Re}(|E_x|^2 - |E_y|^2) \quad (8)$$

This expression describes the power flux density in unit units of  $\frac{W}{m^2}$ :

$$P_s(x, y, z, ) = (|P_{0x}(x, y, z, )|^2 + |P_{0y}(x, y, z, )|^2 + |P_{0z}(x, y, z, )|^2) \quad (9)$$

The generation of the carrier is described below:

$$g(x, y, z, t) = \left( \frac{4\pi k_{pc}}{hc} \right) P_s(x, y, z, ) \exp \left( 4 \ln(0,5) \frac{(t - t_0)^2}{D_t^2} \right) \quad (10)$$

This is the diffusion model drift for electron concentrations:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \left\{ -\mu_n q \nabla (V + N) n + \mu_n k_B T G \left( \frac{n}{N_c} \right) \nabla_n \right\} - r(x, y, z, ) + g(x, y, z, t) \quad (11)$$

As well as the diffusion model drift for the concentrations of the holes:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \left\{ -\mu_p q \nabla (V + N + E_g) p + \mu_p k_B T G \left( \frac{p}{N_p} \right) \nabla_p \right\} - r(x, y, z, ) + g(x, y, z, t) \quad (12)$$

Finally, from the proposed system of equations, the recombination response is obtained. The electrical response is only considered for the Si-GaAs layer:

$$r(x, y, z) = \frac{np - \gamma_n \gamma_p n_{i,eff}^2}{\tau_p (n + \gamma_n n_{i,eff}) + \tau_n (p + \gamma_p n_{i,eff})} + (c_n n + C_p p) (np - \gamma_n \gamma_p n_{i,eff}^2) \quad (13)$$

## 2.4. Plasmonic Light Concentrators

The combination of metal and a dielectric forms a material called plasmons. This material creates electromagnetic waves under the influence of light. The light that hits the metamaterial turns into shallow plasmonic polaritons, which are shorter in wavelength than the incident light. Plasmons are confined waves composed of electrons and plasma that are at the interface between a metal and a dielectric.

The direction of the initiating electromagnetic signal must match the direction of the surface plasmon wave, which can be determined from the metal and dielectric permittivity values. Therefore, modifying the shape of the metal could adjust the direction of both the electromagnetic and the plasmon waves [8]. In other words, the process of changing the shape of the metal allows a greater concentration of light near the space where the plasmon waves are located. Thus, the shape parameter, also called the geometry of the antenna, determines its efficiency, thus making the THz pulse power better in comparison to other possible approaches.

Starting from the operational basis of a typical antenna, different approaches are defined for the construction of a nanoantenna. These typical forms can be initially classified in two categories as shown in Fig. 2.



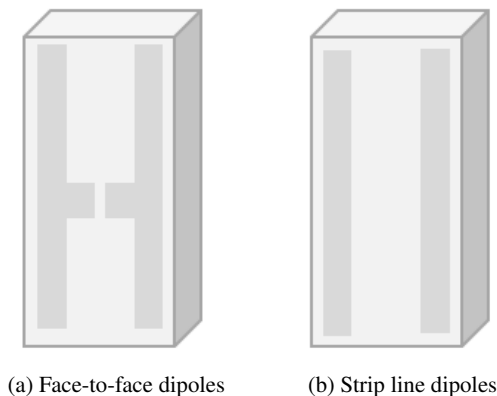


Figure 2. Typical antenna

From this first approach, antennas were built modifying the electrode shapes and their position. These were PCAs based on plasmonic light concentrators, as shown Figure 3a, in this case, the surfaces where the light beam strikes are con-fined in a small space between the two electrodes. The surface surrounding the electrodes is the metal semi conductor [4]. Another approach for building photoconductive antennas is based on plasmonic contact electrodes, as shown in Figures 3b, 3c, and 3d. The main goal of this approach consists of increasing optical absorption near the contact electrodes.

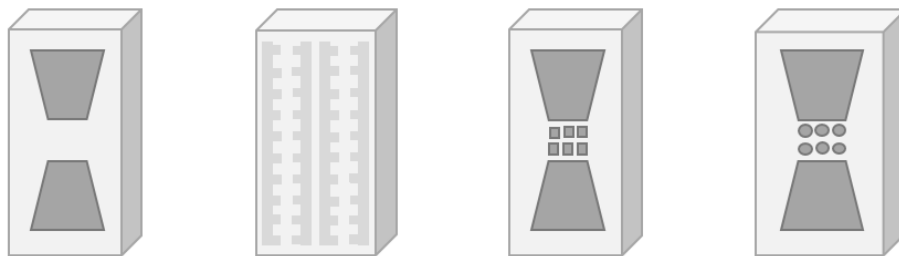


Figure 3. Design PCA based on plasmonic

### 3. State of the art

Terahertz radiation has been widely studied in recent years, given its wide field of applications. There are important advances in the construction of photoconductive antennas according to their application. However, building an antenna is a difficult process mainly due to its size, components, and technology barrier. Therefore, computational modeling offers a good alternative to accomplish this process without an increase in costs. The mathematical principles of the steady model with a nonlinear function (Bernoulli) provide great tools to model the physical phenomena [9], and this equation was formulated by using COMSOL®.

The generation of frequencies in the THz band through optical processes can be classified into two techniques. The first one is called optical rectification and the second technique is based on photoconductor materials. The latter one is more efficient when using laser oscillators. The geometry of this photoconductor material could affect the THz pulse, which is why some researchers focus on the shape of the antenna.

Plasmonic contact electrodes are a novel design with a more effective separation and acceleration of photocarriers forming grating, with SI-GaAs and LT-GaAs substrates in each gap. This kind of geometry features efficient time-varying dipoles as a response to the laser incident [10].

Significant advances have been made in increasing the power efficiency of the THz pulse due to geometries that imply the three dimensions in the contact between electrodes. One of these cases shows that the efficiency of the antenna improved by 7,5 % using a geometry with a jagged shape integrated with a logarithmic spiral on a LT-GaAs substrate [11].

There is also a different kinds of shape, which is composed of a photoconductor with a gap among both contacts, positive and negative, connected to a bowtie antenna. GaAs (LT-GaAs) is used for the substrate [12].

According to the modeling of photoconductive antennas, a great variety of numerical and analytical models have been reported [7], [13], [14], in which it has been possible to distinguish, from the electromagnetic theory or from the transport phenomenon in semiconductors, the parameters involved in improving the efficiency of photoconductive antennas as THz emitters. Analytical models use transport model, to explain the generation of photocurrent in the photoconductive substrate of the antenna, which is responsible for the THz emission [15]. The electromagnetic phenomena, models with approximations to Hertzian dipoles have been reported using Maxwell's equations [16], [17], and HFSS simulations that are widely used to measure the main parameters of the antennas, such as radiation patterns, input impedances, and efficiencies [6].

It is also important to consider that, given the growing interest in this field, the number of research groups has increased worldwide. This includes the THz spectroscopy division of the Helmholtz-Zentrum Dresden- Rossendorf research center in Dresden, Germany and the University of Cambridge's group of applications in THz. This has led to a better positioning and higher impact of indexed journals on THz technology, such as the "*IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*" with 4,342 impact factors, ranked in the first quartile according to SCOPUS.

## 4. Analysis and design of a PCA

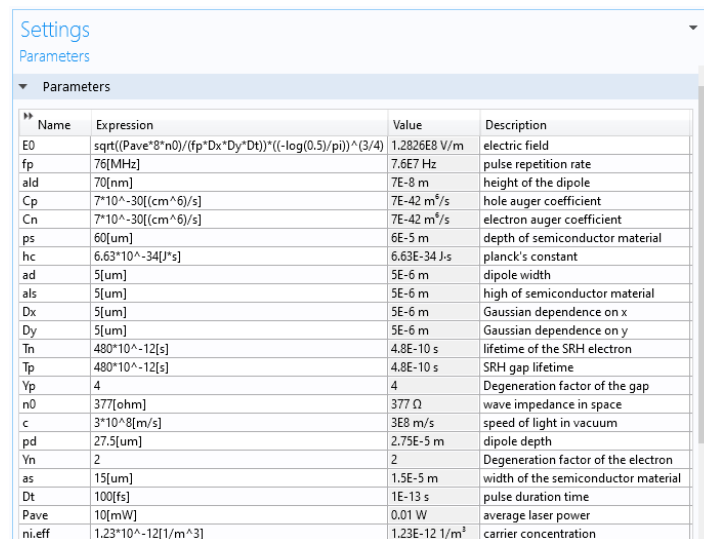
Exploration in the THz band has grown rapidly in recent decades [18]–[20]. There are ultrafast photoconductive antenna systems excited by laser pulses in times less than picoseconds to achieve the emission of THz waves [21]. As mentioned above, some of the advantages of using this technology are: operation at ambient temperature, high signal-to-noise ratio, and precise measurement of the magnitude and phase of the signal, as well as various applications such as pharmaceutical

screening of polymorphous and hydrated forms [22], [23], detection of materials for surveillance and security schemes [22], [24], monitoring of metal processing and construction [2], [22], detection of cancerous tissues [25], absolute thickness measurements [26], and the characterization of materials [21], among others.

For the design process, the materials must be correctly selected and prepared depending on their properties. Here, it must be taken into account that they must not be ionizing and have a high water absorption to facilitate high reflectivity and complete opacity. To achieve operation in THz, lasers with pulses in femtoseconds must be used, which are sent to the polarized antenna to generate an excitation that activates the recombination and generation process of the carrier [5], [21].

Now, by using the equation of the electromagnetic wave in terms of frequency (3) and the incident field (4), the resulting field is obtained by means of (5), thus simulating the optical excitation of the femtosecond pulse and showing the component peaks of the electric field in both spatial and temporal terms. Once this is done, the vector components of the power density and its total flux can be calculated (9), arriving at the generation of the carrier with equation (10) and obtaining the recombination response through (13).

The objective of Table I is to present a compilation of various authors regarding the optical conversion to THz, the geometry of the antenna construction, the type of plasmonic structure, the gap space, the characteristics of the laser, the semiconductor substrate, the polarization voltage, and the dimensions and type of lens, in order to understand what is the response produced by each of the parameters of a PCA and their influence on improving the design and output power.

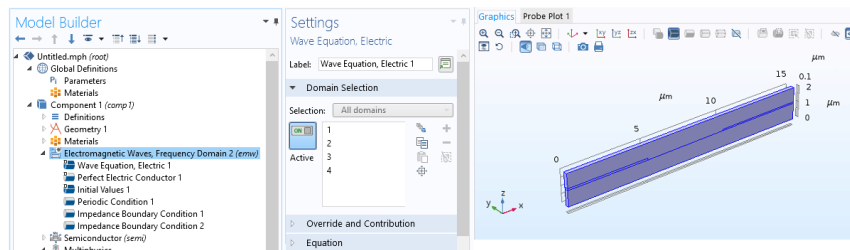


Name	Expression	Value	Description
E0	$\sqrt{\text{Pave} \cdot 8 \cdot n0} / ((fp \cdot Dx \cdot Dy \cdot Dt)) \cdot ((-\log(0.5) / \pi))^{(3/4)}$	1.2826E8 V/m	electric field
fp	76[MHz]	7.6E7 Hz	pulse repetition rate
ald	70[nm]	7E-8 m	height of the dipole
Cp	$7 \cdot 10^{-30} [(cm^6) / s]$	7E-42 m <sup>6</sup> /s	hole auger coefficient
Cn	$7 \cdot 10^{-30} [(cm^6) / s]$	7E-42 m <sup>6</sup> /s	electron auger coefficient
ps	60[um]	6E-5 m	depth of semiconductor material
hc	$6.63 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$	6.63E-34 J·s	planck's constant
ad	5[um]	5E-6 m	dipole width
als	5[um]	5E-6 m	high of semiconductor material
Dx	5[um]	5E-6 m	Gaussian dependence on x
Dy	5[um]	5E-6 m	Gaussian dependence on y
Tn	$480 \cdot 10^{-12} [s]$	4.8E-10 s	lifetime of the SRH electron
Tp	$480 \cdot 10^{-12} [s]$	4.8E-10 s	SRH gap lifetime
Yp	4	4	Degeneration factor of the gap
n0	377[ohm]	377 Ω	wave impedance in space
c	$3 \cdot 10^8 [m/s]$	3E8 m/s	speed of light in vacuum
pd	27.5[um]	2.75E-5 m	dipole depth
Yn	2	2	Degeneration factor of the electron
as	15[um]	1.5E-5 m	width of the semiconductor material
Dt	100[fs]	1E-13 s	pulse duration time
Pave	10[mW]	0.01 W	average laser power
ni.eff	$1.23 \cdot 10^{-12} [1/m^3]$	1.23E-12 1/m <sup>3</sup>	carrier concentration

Figure 4. PCA parameters in the COMSOL software

**Table I.** Table of construction parameters and design of PCAs

<b>Article name</b>	Computational modeling of plasmonic thin - film terahertz photoconductive antennas [13]	High-Power terahertz generation using large-area plasmonic photoconductive emitters [10]	Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes [12].
<b>Authors</b>	Burford and El-Shenawee	Yardimci, Yang, Berry, and Jarrahi	Berry, Wang, Hashemi, Unlu, and Jarrahi
<b>Purpose of the article</b>	To present a computational study that preserves the PCA performance via a thin-film plasmonic electrode configuration to solve the issue with low output power in THz PCAs.	To present a novel desing of large-area photoconductive emitters which incorporates plasmonic contact electrodes to offer significantly higher optical-to-THz conversion efficiencies compared with conventional designs.	To demonstrate the use of plasmonic contact electrodes in reducing the low quantum efficiency of photoconductive THz optoelectronics, thus enhancing the optical-to-THz conversion and the reception of THz.
<b>Geometry</b>	Dipole antenna	Large-area plasmonic photoconductive emitters	Bowtie antenna
<b>Plasmonic structure</b>	Fine meshing nanodisks	Set of plasmonic gratings	Plasmonic gratings
<b>Plasmonic structure dimensions</b>	200 nm — 520 nm — 75 nm	axis z (50 nm) — axis x (5 and 10 μm) — axis y (100 nm)	Axis z (100 nm) — Axis y (50 nm)
<b>Plasmonic structure material</b>	Ti (Titanium), Au (Gold).	Au (Gold)	Au (Gold)
<b>Bias electric voltage</b>	40 V	18 V	30 V
<b>Electrodes material</b>	Au (Gold)	Au (Gold)	Au (Gold)
<b>Electrodes dimensions</b>	Don't Specified	axis z (50 nm) — axis x (2 μm) — axis y (1mm)	Axis x (60 nm) — Axis y (100 and 30 nm)
<b>Gap</b>	5 μm	3 μm	20 μm
<b>Semiconductor substrate</b>	Low-temperature-grown GaAs (LT-GaAs)	LT-GaAs — SI-GaAs	Low-temperature-grown GaAs (LT-GaAs)
<b>Semiconductor substrate dimensions</b>	axis z (120 nm) LT-GaAs layer	axis y and x (1 x 1 mm <sup>2</sup> )	Not specified
<b>Antireflection method</b>	N/A	Silicon nitride (Si3N4)	SiO2 (Silicon Oxide)
<b>Antireflection method dimensions</b>	N/A	axis z (350 nm) — axis y and x (1x1 mm <sup>2</sup> )	Axis z (150-nm-thick)
<b>Laser</b>	Ti:sapphire mode-locked laser	Ti:sapphire mode-locked laser	Ti:sapphire mode-locked laser
<b>Pulse width</b>	100 fs	200 fs	200 fs
<b>Optical pump powers</b>	10 mW	240 mW	5–25 mW
<b>Lens material</b>	Silicon lenses	Silicon lenses	Silicon lens
<b>Lens type</b>	Not specified	Hyper-hemispherical lenses	Polyethylene spherical lenses
<b>Output power level</b>	30-300 μW	3,8 mW	250 μW
<b>Radiation THz range</b>	0,1-1,1 THz	0,1-5 THz	0,35-0,55 THz



**Figure 5.** Geometry dimensions of the PCA

#### 4.1. Conventional PCA simulation

Thanks to the development of specialized software to simulate physical phenomena, COMSOL is used in its finite element method (FEM) mode to facilitate troubleshooting and obtain more accurate currents in order to have numerical stability and values closer to reality. With this method, it is easy to couple different physics. Next, Fig. 4 shows each of the parameters included in the COMSOL tool.

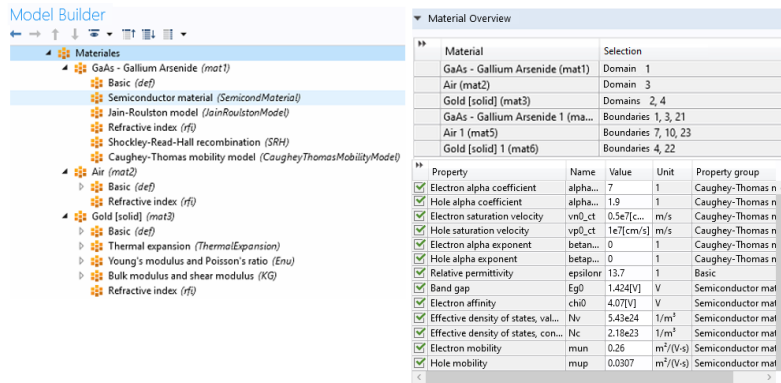


Figure 6. Domains and material properties of PCA

As well as the construction of the geometry dimensions, which can be seen in Fig. 5 and the definition of domains and material properties in Fig. 6.

Once this has been defined, the work domains, the conditions of impedance and periodicity are assigned, as shown in Figure 7.

Then, the design of the PCA is simulated, observing the concentration of the electric field in the gap zone of the dipole (Fig. 8a), the concentration of electrons in the gap zone on the semiconductor substrate closest to the dipole anode (Fig. 8b), the concentration of holes with higher gap intensity of the distributed dipole in most of the semiconductor substrate (Fig. 8c), and the concentration of electric potential in the antenna's anode and the semiconductor substrate given by the incident beam (Fig. 8d).

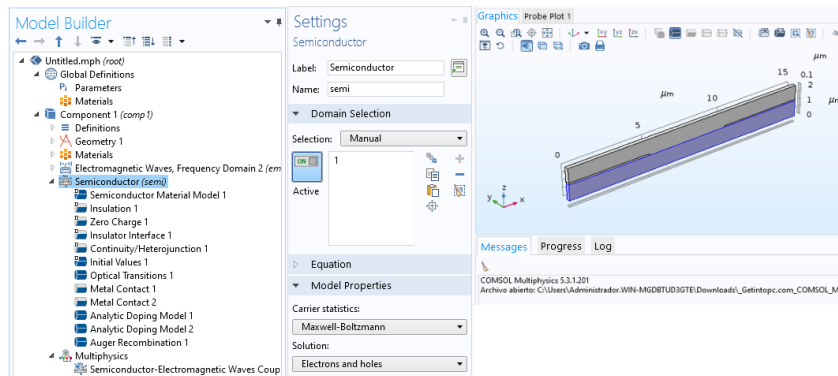


Figure 7. Domains and material properties of the PCA

Similarly, the resulting amplitude of the electric field (THz radiation vs. time) can also be observed in Figure 9.

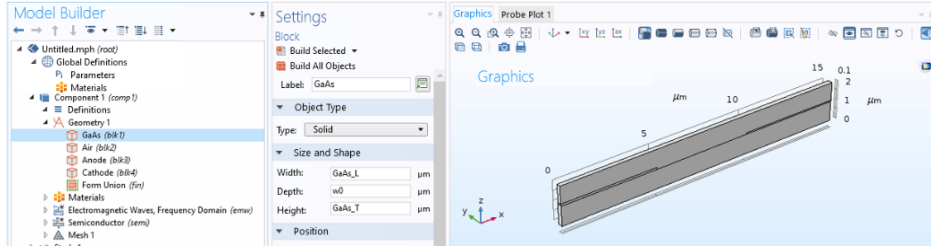


Figure 8. Conditions of impedance and periodicity of the PCA

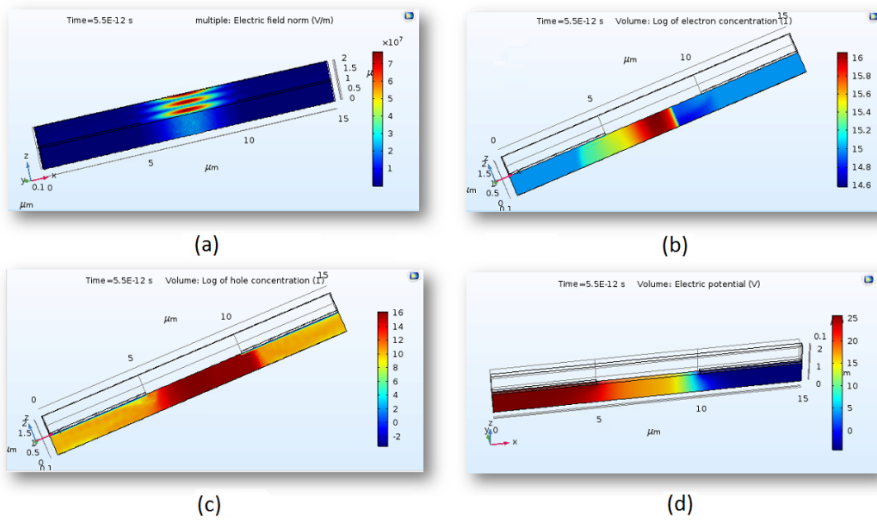


Figure 9. Complete view of the photoconductive antenna

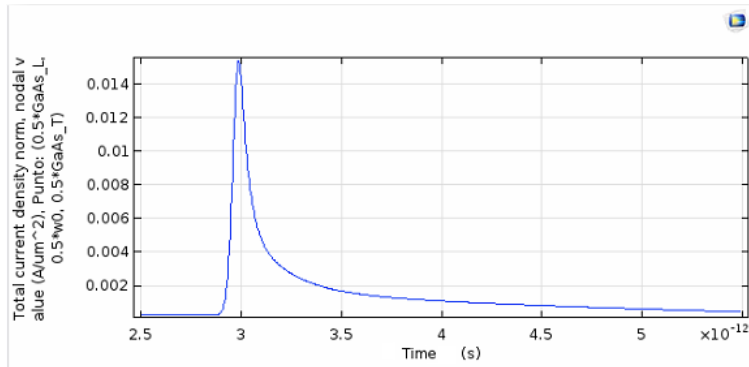


Figure 10. Electric field (THz radiation vs. time) of the PCA

## 5. Conclusions

In accordance with the proposed objective, it is possible to identify the excitation parameters that allow the generation of THz radiation using PCAs. These parameters were identified based on the state of the art described in this paper.

Similarly, it was also possible to reproduce the theoretical models that describe the behavior of photoconductive antennas, while also identifying the geometric model and the physicochemical behavior to understand the ideal topologies leading to the generation of the desired photocurrents, which are necessary for applications in the industry.

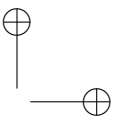
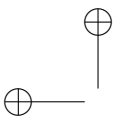
The analytical and mathematical modeling of this design is facilitated by using the COMSOL finite element solver, in which the equations involved are configured. Then, this tool proceeds to simulate them, depending on the initial parameters that were configured to obtain the photocurrent peak. All the obtained results such as the concentration of electrons and holes in the semiconductor surface, its generated electric field, and, finally, the THz radiation peak, were identified and explained based on a conventional, theory-based photoconductor antenna solution, and it was possible to obtain a photocurrent peak of the order of 0,1-1,2 THz, which shows that the application of the theories was satisfactory.

## References

- [1] L. Hou, S. Chen, Z. Yan, and W. Shi, "Terahertz radiation generated by laser induced plasma in photoconductive antenna", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 49, no. 9, pp. 785–789, 2013. <http://doi.org/10.1109/JQE.2013.2275019> ↑380, 381
- [2] D. Turan, S. C. Corzo-Garcia, E. Castro-Camus, and M. Jarrahi, "Impact of metallization on the performance of plasmonic photoconductive terahertz emitters", *Microwave, MTT-S International Symposium*, pp. 575–577, 2017. <http://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058631> ↑380, 386
- [3] Y. S. Lee, "Basic Theories of Terahertz Interaction with Matter", in *Principles of Terahertz Science and Technology*, pp. 1–40, 2008. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-09540-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-0-387-09540-0_2) ↑380
- [4] N. T. Yardimci and M. Jarrahi, "Nanostructure-Enhanced Photoconductive Terahertz Emission and Detection", *Nano-micro Small*, vol. 14, no. 44, pp. 180–243, 2018. <https://doi.org/10.1002/sm11.201802437> ↑380, 384
- [5] Y. S. Lee, *Principles of Terahertz Science and Technology*. Springer, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09540-0> ↑381, 386
- [6] J. Zhang, M. Tuo, M. Liang, X. Wang, and H. Xin, "Contribution assessment of antenna structure and in-gap photocurrent in terahertz radiation of photoconductive antenna", *Journal of Applied Physics*, vol. 124, no. 5, p. 053107, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5038341> ↑381, 385
- [7] N. Khiabani, Y. Huang, Y. C. Shen, and S. Boyes, "Theoretical Modeling of a Photoconductive Antenna in a Terahertz Pulsed System", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 4, pp. 1538–1546, 2013. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2239599> ↑381, 385
- [8] J. A. Dionne, L. A. Sweatlock, H. A. Atwater, and A. Polman, "Planar metal plasmon waveguides: frequency-dependent dispersion, propagation, localization, and loss beyond the free electron model", *Physical Review B*, vol. 72, no. 7, pp. 75–90, 2005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.075405> ↑383
- [9] E. Moreno, M. F. Pantoja, F. G. Ruiz, J. B. Roldán, and S. G. García, "On the Numerical Modeling of Terahertz Photoconductive Antennas", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, vol. 35, no. 5, pp. 432–444, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10762-014-0060-5> ↑384
- [10] N. T. Yardimci, S. H. Yang, C. W. Berry, and M. Jarrahi, "High-Power Terahertz Generation Using Large-Area Plasmonic Photoconductive Emitters", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, no. 2, pp.

- 223–229, 2015. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2395417> ↑385, 387
- [11] S. H. Yang, M. R. Hashemi, C. W. Berry, and M. Jarrahi, “7.5% Optical-to-Terahertz Conversion Efficiency Offered by Photoconductive Emitters With Three-Dimensional Plasmonic Contact Electrodes”, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 575–581, 2014. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2342505> ↑385
- [12] C. W. Berry, N. Wang, M. R. Hashemi, M. Unlu, and M. Jarrahi, “Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes”, *Nature Communications*, vol. 4, no. 1, p. 1622, 2013. <https://doi.org/10.1038/ncomms2638> ↑385, 387
- [13] N. Burford and M. El-Shenawee, “Computational modeling of plasmonic thin-film terahertz photoconductive antennas”, *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 33, no. 4, p. 748, 2016. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.000748> ↑385, 387
- [14] Z. Piao, M. Tani, and K. Sakai, “Carrier Dynamics and Terahertz Radiation in Photoconductive Antennas”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 39, no. 1, pp. 96–100, 2000. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.96> ↑385
- [15] L. Duvillaret, F. Garet, J. F. Roux, and J. L. Coutaz, “Analytical modeling and optimization of terahertz time-domain spectroscopy experiments, using photoswitches as antennas”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 7, no. 4, pp. 615–623, 2001. <https://doi.org/10.1109/2944.974233> ↑385
- [16] K. Ioannidi, C. Christakis, S. Sautbekov, P. Frangos, and S. K. Atanov, “The Radiation Problem from a Vertical Hertzian Dipole Antenna above Flat and Lossy Ground: Novel Formulation in the Spectral Domain with Closed-Form Analytical Solution in the High Frequency Regime”, *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, pp. 1–9, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/989348> ↑385
- [17] J. Ren, Z. Jiang, M. I. Bin Shams, P. Fay, and L. Liu, “Photo-induced electromagnetic band gap structures for optically tunable microwave filters”, *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 161, pp. 101–111, 2018. <https://doi.org/10.2528/PIER17120306> ↑385
- [18] P. Johari and J. M. Jornet, “Packet size optimization for wireless nanosensor networks in the Terahertz band”, in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510603> ↑385
- [19] J. M. Jornet and I. F. Akyildiz, “Graphene-based Plasmonic Nano-Antenna for Terahertz Band Communication in Nanonetworks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 12, pp. 685–694, 2013. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.SUP2.1213001> ↑385
- [20] T.Y. Jourau, M. Bashirpour, M. Forouzmehr, S. Hosseinienejad, M. Kolahdouz, and M. Neshat, “Improvement of Terahertz Photoconductive Antenna using Optical Antenna Array of ZnO”, *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1414, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38820-3> ↑385
- [21] C. Liu, L. Du, W. Tang, D. Wei, J. Li, L. Wang, G. Chen, X. Chen, and W. Lu, “Towards sensitive terahertz detection via thermoelectric manipulation using graphene transistors”, *NPG Asia Materials*, vol. 10, pp. 318–327, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41427-018-0032-7> ↑385, 386
- [22] H. Hubers, M. F. Kimmitt, N. Hiromoto, and E. Brundermann, “Terahertz Spectroscopy: System and Sensitivity Considerations”, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 321–331, 2011. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2159877> ↑386
- [23] S. Lepeshov, A. Gorodetsky, A. Krasnok, N. Toropov, T. A. Vartanyan, P. Belov, A. Alú, and E. U. Rafailov, “Boosting Terahertz Photoconductive Antenna Performance with Optimised Plasmonic Nanostructures”, *Scientific Reports*, vol. 8, no. 6624, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25013-7> ↑386
- [24] J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira, and D. Zimdars, “THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs”, *Semiconductor Science and Technology*, vol. 20, no. 7, 2005. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/7/018> ↑386
- [25] J. Alda, J. M. Rico-García, J. M. López-Alonso, and G. Boreman, “Optical antennas for nano-photonics applications”, *Semiconductor Science and Technology*, vol. 16, no. 5, 2005. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/5/017> ↑386
- [26] E. Üstün, Ö. Eroglu, U. M. Gür, and Ö. Ergül, “Investigation of nanoantenna geometries for maximum field enhancements at optical frequencies”, in 2017 Progress in *Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS)*, St. Petersburg, 2017, pp. 3673–3680. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262396> ↑386





---

**Diana González Galindo**

Telecommunications Engineer, Universidad Cooperativa de Colombia. Her research interests include antennas, wireless communications systems, and computational modeling of THz photoconductive antennas.  
e-mail: [diana.gonzalezga@campusucc.edu.co](mailto:diana.gonzalezga@campusucc.edu.co)

---

**Cristhian Torres Urrea**

Telecommunications Engineer, Universidad Cooperativa de Colombia. His research interests include antennas, wireless communications systems, and computational modeling of THz photoconductive antennas.  
e-mail: [cristhian.torresu@campusucc.edu.co](mailto:cristhian.torresu@campusucc.edu.co)

---

**Óscar Corredor Camargo**

Electronics Engineer, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, and Master's Degree in Information and Communication Science from the same university. He currently works with the Industrial Automation research group and as an assistant professor of the Engineering department of the Universidad Cooperativa de Colombia. His research interests include antennas, wireless communications systems, and computational modeling of THz photoconductive antennas.  
e-mail: [oscar.corredor@campusucc.edu.co](mailto:oscar.corredor@campusucc.edu.co)

---

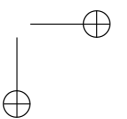
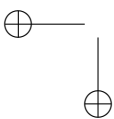
**David Suárez Mora**

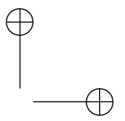
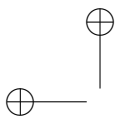
Electronics Engineer, Universidad E.C.C.I. de Colombia. He currently works with the Industrial Automation research group and as an assistant professor for the Engineering Department of the Universidad Cooperativa de Colombia. His research interests include antennas, wireless communications systems, and computational modeling of THz photoconductive antennas.  
e-mail: [david.suarezm@campusucc.edu.co](mailto:david.suarezm@campusucc.edu.co)

---

**Carlos Criollo Paredes**

Electronics Engineer, Universidad de Nariño, Colombia, and Master of Science in Micro-electronics, Universidad de los Andes, Colombia. He currently works as a professor at the Engineering department of the Centro de Estudios Superiores María Goretti in Pasto, Colombia. His research interests include antennas and their computational modelling.  
e-mail: [ca.criollo99@gmail.com](mailto:ca.criollo99@gmail.com)





## Design of a Troubleshooting Digital Test Bench for the Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 and 350 Aircraft GCU

*Diseño de un banco digital de pruebas para solución de problemas en la GCU de las aeronaves Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 y 350*

**Carlos A. Cabrera-Arias**<sup>1</sup>, **Fabián S. Garay-Rairan**<sup>1</sup>, **Ingrid Arango-Calderón**<sup>1</sup>, **Óscar E. Gómez-Vargas**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Aviación - ESAVE (Bogotá, Colombia). Correspondence email: [fabiangarayrairan@cedoc.edu.co](mailto:fabiangarayrairan@cedoc.edu.co)

Recibido: 01/06/2020. Modificado: 31/08/2020. Aceptado: 15/09/2020.

### Abstract

**Context:** The Colombian Army's First Aircraft Maintenance Battalion must periodically test the performance of Generator Control Unit (GCU) on its Beechcraft King Air aircraft, which compels the operator to assume uncomfortable and non-ergonomic physical positions. This article proposes the use of a portable digital troubleshooting test bench for these units that facilitates the taking of measurements, the interpretation of the acquired information, and the technical reports.

**Method:** The Integrate, Innovation, Process model (IIP) for the development of aviation technology innovation projects was used to design the test bench. Then, its functional modules were defined, and voltage and impedance measurement devices, an internal report storage system, and the user interface were included. Tests were conducted together with technical operators on the available Beechcraft King C-90, 200, B 200, 300, and 350 series aircraft. Finally, a technical report was elaborated to validate the test bench results.

**Results:** The number of operators required to carry out the tests was reduced from four to one. The digital test bench only requires the connection of measurement harnesses by the operator, so it allows an improvement in ergonomics for the personnel. Using the bench, the review and evaluation time of the GCU was reduced from 120 minutes to 26 minutes, which implies an 86,66% decrease in fuel consumption.

**Conclusions:** By using the digital troubleshooting test bench, the number of operators needed and the checkup and assessment times of the GCU were reduced, which means a decrease in fuel expenses. Its ease of transportation allows aircraft to be checked outside the Maintenance Battalion hangars, but the implementation of a USB port to store the reports should be considered.

**Keywords:** Aeronautics, avionics, aircraft, beechcraft King, GCU, test bench, troubleshooting.

**Acknowledgments:** We would like to thank the First Aircraft Maintenance Battalion of the Colombian National Army and the Aviation School for their contribution to the development of the prototype. This project was funded by the National Army of Colombia, Science of Science and Technology, under internal code No. 118315.

**Language:** English

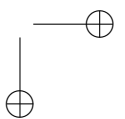
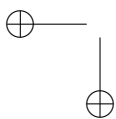
### Open access



Cite this paper as: C. Cabrera, F. Garay, I. Arango, O. Gómez: "Design of a Troubleshooting Digital Test Bench for the Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 and 350 Aircraft GCU", *Ing.* Vol. 25, Num. 3, pp. 393-409 (2020).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.16903>



### Resumen

**Contexto:** El Batallón de Mantenimiento de Aviación No. 1 del ejército colombiano debe realizar pruebas periódicas del funcionamiento de la Unidad de Control de Generado en sus aeronaves *Beechcraft King Air*, que obligan al operador a asumir posiciones físicas incómodas y no ergonómicas. Este artículo propone el uso de un banco portátil digital de solución de problemas para estas unidades que facilite la toma de medidas, la interpretación de la información adquirida y la generación de informes técnicos.

**Método:** Para el diseño del banco de pruebas se usó el modelo integrado *Integrate, Innovation, Process* (IIP) para el desarrollo de proyectos de innovación en tecnología para la aviación. Posteriormente, se establecieron los módulos funcionales del banco y se incluyeron dispositivos de medición de tensiones e impedancias, el sistema de almacenamiento interno de informes y la interfaz de usuario. Se realizaron pruebas junto con operadores técnicos en las aeronaves disponibles de la serie *Beechcraft King C-90, 200, B 200, 300 y 350*. Finalmente, se elaboró un informe técnico de validación de los resultados del banco.

**Resultados:** Se redujo la cantidad de operarios necesarios para el desarrollo de las pruebas de cuatro a uno. El banco de pruebas digital solo requiere la conexión de arneses de medida por parte del operador, lo que permite una mejora en la ergonomía del personal. Con el uso del banco se disminuye el tiempo de revisión y valoración de la GCU de 120 minutos a 26 minutos, lo cual, a su vez, representa una disminución del 86,66 % en consumo de combustible.

**Conclusiones:** Con el uso del banco de pruebas digital de solución de problemas, se redujo la cantidad de operarios necesarios y los tiempos de revisión y valoración de la GCU, lo cual representa una disminución en los gastos en combustible. Su facilidad de transporte del banco permite revisión de las aeronaves fuera de los hangares del Batallón de Mantenimiento, pero se debe contemplar la implementación de un puerto USB para almacenar los informes.

**Palabras clave:** Aeronáutica, aviónica, aeronave, Beechcraft King, GCU, banco de pruebas, solución de problemas.

**Agradecimientos:** Al Batallón de Mantenimiento de Aviación No. 1 del Ejército Nacional de Colombia y la Escuela de Aviación por su contribución y colaboración en el desarrollo del prototipo. Este proyecto fue financiado por la Dirección de Ciencia y Tecnología del Ejército Nacional de Colombia, bajo código interno No. 118315.

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

Nowadays, the First Aircraft Maintenance Battalion (BAMAV No. 1) must periodically test the performance of the Generator Control Unit (GCU) of its Beechcraft King Air B200 series aircraft (BB006, BBT002, BB1152, BB 1615, B-300-FL 713 B350, FL 454, and C-90). These tests are based on the protocols defined within the maintenance manual for this series' ATA 24 [1]. This manual specifies the use of a test bench that allows the operator to take 16 measurements of voltage and resistance at different electrical points of the GCU. The test requires the aircraft's engines to be at 70 % power and the GCU to be connected to the test bench in order to take measure each of the 16 channels. The test takes approximately two hours (the average time it takes the operator to measure the voltage and resistance), where the engines must be cycled on and off until the end of the test, which means high fuel costs. Table I shows the reported fuel consumption values in GCU tests.

**Table I.** Reported fuel consumption in GCU fuel tests.

Aircraft	Amount (Gal/h)	Consumption in tests (Gal/h)
B-200	88	123,2
B-350	88	123,2
B-300	88	123,2
C-90	74	103,6

\*These values correspond to the records of the First Aircraft Maintenance Battalion when testing the King 200, B200, 300, 350 and C90 aircraft.

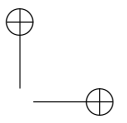
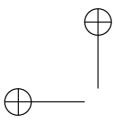
Data collection from each test is carried out according to the pre-established format for GCU testing of the BAMAV No. 1, and the information is stored in each aircraft. For taking measurements, the bench integrates a multimeter with an annual calibration certificate, where the operator selects the unit of measurement and the option of measuring voltage or resistance. Due the importance of GCU troubleshooting tests, the Military Aviation Research Group of the Army Aviation School (ESAVE) and the technical personnel of the BAMAV No. 1 identified the following difficulties making the troubleshooting protocol measurements for the GCU of the Beechcraft King Air aircraft:

- a) the GCU unit of the aircraft is in a difficult access location, since it is necessary to lift part of the aircraft floor to reach it;
- b) the test bench proposed by ATA 24, forces the operator to assume uncomfortable and non-ergonomic positions with the use of the multimeter for measurement;
- c) channel selection in the GCU troubleshooting bench and multimeter operation requires the operator leave the unit's location, forcing the support of an additional technician to perform the test; and
- d) the approximate time for carrying out the test largely depends on the agility and maneuverability of the measuring instrument by the operator.

Therefore, the design of a digital portable bench was proposed for the GCU troubleshooting tests of this aircraft series. This device would automatically select channels, test the GCU, interpret the acquired information, and generate technical reports of the tests, with the support from a server belonging to the Aircraft Maintenance Battalion. The bench reduces the fuel consumption, time, and personnel required to carry out the test, in addition to improving the technical personnel's occupational health and safety by standardizing and optimizing maintenance processes and improving the traceability of GCU inspection processes.

## 2. Technological search

To find development references for this type of test bench aside from those by the ATA 24 manual, a technological search was carried out with the help of the Intellectual Property department of the Directorate of Science and Technology of the Colombian National Army. The search was carried out in the main databases for consulting patents and projects, which contains the databases of the



Colombian Superintendence of Industry and Commerce, the United States' USPTO, the World Intellectual Property Organization (OMPI/INPI), the European companies Epoline and Espacenet, and the Chinese SIPO GOV. As a result, no pre-existing products or projects were found. However, this section describes some of the technological developments that have been implemented to solve GCU problems in this aircraft series.

## 2.1. Testing and evaluating electric generator sets

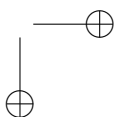
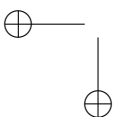
The *Method and Apparatus for Automatically Testing and Evaluating Electric Generator Sets* with patent number US5949247A consists of a fault detection system through the consumption detection and monitoring under the voltage and current standards in a feedback system where the information is analyzed. Then, when the the normal operating parameters of the generator deviate from the standard and enter a zone of possible risk or malfunction, the system determines what the failure could be from the variable that reported the deviation [2]. This bench is useful for AC systems related to electric generators, but it does not directly involve the GCU; it depends on operator control signals, and its operability relies on under digital signal. Furthermore, its sampling frequency depends on the maximum frequency within the generator system. This patent lacks control points or power lines that handle 3 signals to analyze (impedances, voltages, and currents).

## 2.2. GCU Test Box in the ATA 24 KING 200 Aircraft Maintenance Manual

The ATA 24 Beechcraft King C-90, 200, B200, 300, and 350 aircraft maintenance manuals propose a test box to perform the GCU troubleshooting test. It has a contact knob with which each of the 16 measurement points of the control unit can be selected. The operator, aided by a multimeter, and according to the measurement procedure, must select the variable, start the motors, operate on and off cycles, and take the measurement on the test box. Using this test bench, the estimated procedure time is 2 hours with engine ignition cycles at approximately 70 % power. Once the measurements have been carried out, the information acquired is analyzed by a specialized technician (different from the operator) who determines whether the component is in operating conditions or if, on the contrary, it must be replaced and repaired. The voltages, currents, and impedances table, as well as the GCU verification procedure are set out in the ATA 24 aircraft maintenance manual [1]. However, the conditions under which the test is performed and its times make it necessary to develop a test bench for the GCU to facilitate the procedure.

## 2.3. Partial discharge detection, location, and interpretation

This invention registered under patent number ES2372021T3, a device for the detection, location, and interpretation of a partial electric shock. To this effect, it is made up of 2 measurement probes and a synchronization probe, where the electrical equipment is diagnosed from the phase of the detected signals, which allows assessing damage to the electrical insulation, among other considerations [3]. Although the project requires a control unit and use under certain conditions, it could be adapted to aeronautical electrical systems. However, this device was not proposed in the context of a troubleshooting bench, and it is therefore not applicable for use in the Beechcraft King aircraft's GCU.



### 3. The electrical system of the Super King Air 200 aircraft

The Super King Air 200 Series aircraft are a family of twin turboprop aircraft designed and produced by Beechcraft. Its direct current electrical system is made up of two generators connected in parallel, a battery, a panel of DC components, and a connector for an external plant, as seen in Fig. 1. It should be noted that, as part of the continuous fleet modernization by the National Army the inverters that are part of the manufacturer's original aircraft were removed. The aircraft's

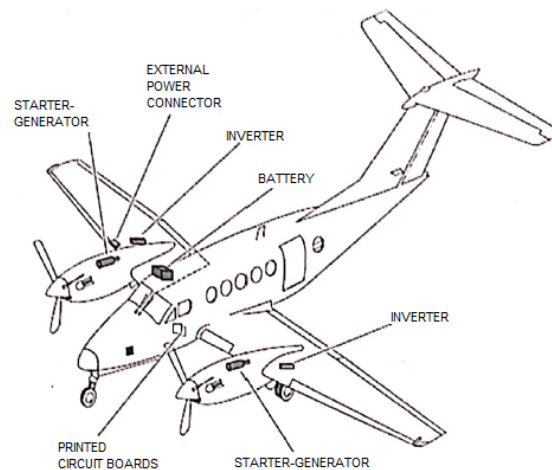


Figure 1. Electrical system of the Beechcraft King Air [1]

primary electrical system is a 30 VDC generator system, regulated to  $28,25 \pm 2,5$  volts, and it has a capacity of 250 amps to supply current to the main distribution bars (hot battery bus, main battery bus, left generator bus, right generator bus, isolation bus, No. 1 dual fed bus, No. 2 dual fed bus, No. 3 dual fed bus, No. 4 dual fed bus). The airship's electrical diagram can also be seen in Fig. 2.

#### 3.1. Generator Control Unit (GCU)

The Engine-Generators are controlled by the GCU. These units are located in the front of the aircraft, specifically below the main mast aisle. During normal operation, each voltage regulator monitors the engine-generator's voltage output and controls the produced electromagnetic field to maintain a constant load under variable operating conditions such as changes in speed, voltage, and temperature of each motor.

Among the main functions of the GCU are:

- Relay control.
- Regularly measuring and controlling voltage in the generators.
- Checking the connection and disconnection in parallel between generators.

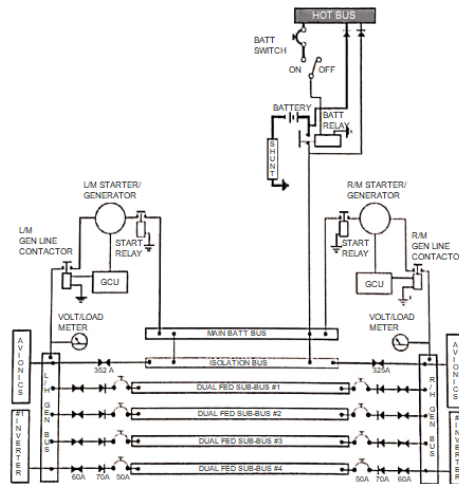


Figure 2. General electrical diagram of the Beechcraft King aircraft [1]

- Measuring reverse currents.

### 3.1.1. Relay control and voltage regulation

The GCU monitors the starter motor output voltage and controls the coils excitation fields, thus maintaining a constant voltage load that allows supplying electric current to each component under variable engine operating conditions. For the control unit to regulate the motors, it must be maintained at a residual voltage. This is obtained from generator terminal B and must be between 0,5 to 1,2 VDC.

### 3.1.2. Control of parallel connection and disconnection between generators

It is carried out with all the input terminals of all the connected devices coincide with each other, as well as their output terminals. The operation of an equalizer circuit is necessary to distribute equitably all loads connected to the aircraft. The voltage regulators are interconnected and employ the LH and RH relays in parallel, energized by the reverse current relays.

### 3.1.3. Reverse current relays

When the generator fields are excited for some reason or when the generator is below the minimum point and positive charge cannot be maintained, the generator requests, through the reverse current relay, a load to the aircraft busbar "Main Batt Bus", which is connected to the battery. This reverse current relay is a normally open electrical device that, being magnetically switched, allows the passage of current from the battery to the aircraft components. However, were the above to happen, the aircraft would enter an emergency condition and have to land immediately. The measurement of reverse currents allows the protection of the connection line of the generators. Its function is to measure the voltage and current that pass through the line. If the voltage is high (greater than 32,5 VDC), this will open the internal contact of the relay that will disconnect the generator.

## 4. Methodology: bench design

The test bench design and development were carried out according to an Integrate, Innovation, Process model (IIP) for the development of aviation technology innovation projects: which involves active project management for risk mitigation in a research project portfolio [4]. Thus, as science and technology have become a trend of convergence in the aeronautical sector, projects have become large, complex and which is why they must be rapid, reasonable, and objective to be successful [5]. This model makes use of the activities provided by standards and methodologies for projects that seek to generate innovation in products for the aeronautical sector. To this effect, the 5 phases of the model, which can be seen in Fig. 3, were used [6].

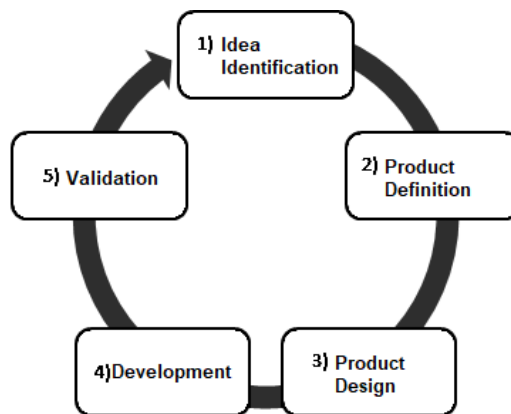


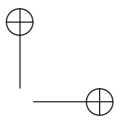
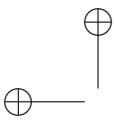
Figure 3. IIP Integrated Model Phases for the development of aviation technology innovation projects [6]

The model was applied correctly in every phase of the study case project, and its use assured quality procedures with the implementation of its different tools. The evaluation of the model also verified product innovation, which was a structural focus in this case. Therefore, the model can be considered as an integrated IIP model that goes beyond product development because it permits the generation of new knowledge and new business models in advanced maturity phases, as well as in future commercialization.

### 4.1. Idea identification

The BAMAV No. 1 and ESAVE have implemented innovative practices in the development of their activities, which is part of the articulating axis of the Colombian National Army's institutional transformation plan [7]. Therefore, no effort has been spared in improving maintenance processes, identifying the parts of aircraft engines considered to have a high turnover in the warehouse. For this specific exercise, the aircraft's GCU, the spark plugs, and the ignition elements subsystem are individualized [8], [9]. The identified ideas must supply the need to optimize maintenance processes, automating the GCU troubleshooting tests in compliance with those in the ATA maintenance manual.





## 4.2. Product definition

In this phase, a conceptual approach to the GCU operation and its troubleshooting test protocols in the maintenance manuals was set, as well as test requirements and developer designation. Likewise, a review was carried out on the manufacturer's documentation and the experience of maintenance personnel of BAMAV No. 1 provided information on the tests that are generally carried out on the aircraft. Additionally, a conceptual definition of the product, the determination of its functional (FR) and non-functional (NFR) requirements, and its formalization were developed. Among these were automation (FR), availability (FR), security (NFR), connectivity (NFR), resistance (NFR), aesthetics (NFR), portability (NFR), ergonomics (NFR), adaptability (FR), and maintainability (NFR).

## 4.3. Product design

For the bench design, the Quality Function Deployment (QFD) and Design for Excellence (DfX) tools were used. Then, a conceptual design was made to lay out the required product, and the system was decomposed to relate each hardware, software, and structure requirement [6].

### 4.3.1. Conceptual design

The conceptual design contemplated the operation sequence (start, test, stop), understanding the function of each operation and the actions that the elements within the bench would perform. First, we proceeded to understand the test box circuit diagram for the GCU (shown in Fig. 2) and the wiring diagram available in the maintenance manual for the aircraft's ATA 24, with which the number of channels to be measured was determined, as well as the type of contact to be used for channel selection and connection of the measurement device.

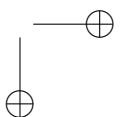
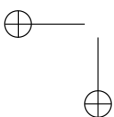
### 4.3.2. Design selection

The design was selected by means of the Pugh method and by comparison with the planned designs, this under the detailed analysis by the group of experts belonging to BAMAV No. 1 and ESAVE.

### 4.3.3. Detailed design

In accordance with the information above, the parameters and electrical characteristics that the digital bench should carry were established, and the type of relay that replaces the manual selection of channels by the operator was selected. Likewise the type of microcontroller that controls the opening or closing of measurement channels was determined; the EXP432P401R microcontroller was selected, and two independent channels were established for voltage and resistance collection, according to the procedure defined in the GCU maintenance manual. The layout of the circuit diagram can be seen in Fig. 4.

It is necessary for the bench's control interface to take the voltage or resistance data and interpret and compare them with the standards for each aircraft. Therefore, 2 independent measurement



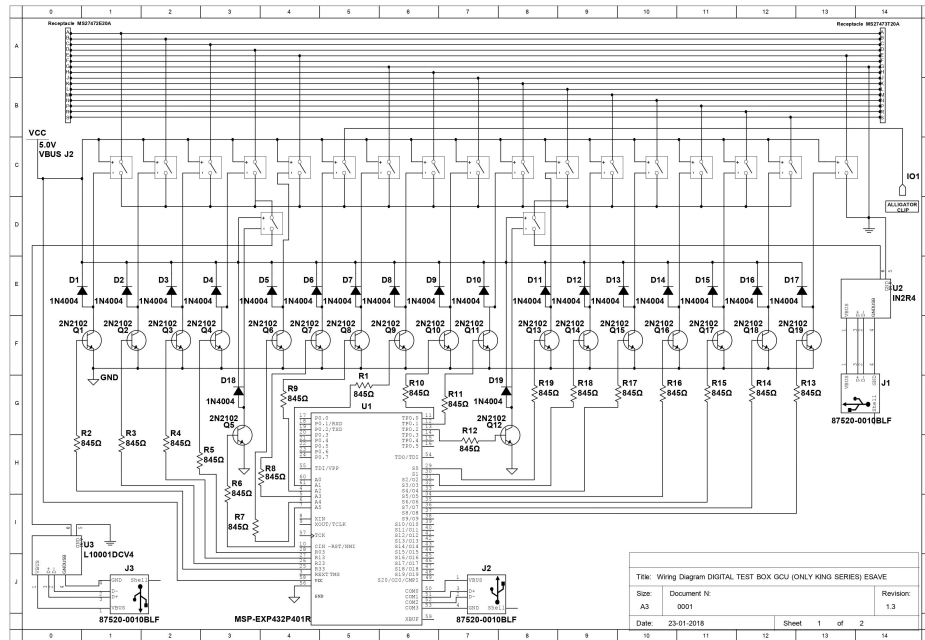


Figure 4. GCU troubleshooting bench circuit diagram.

instruments were one for voltages, which handles the UART, RS232, RS485, USART communication protocols; and another for impedances, compatible with the LABVIEW software measurement interface modules, and preferably with POE power in the case of using a TCP/IP 10BT, RJ45 connection. The power system was established for both the computer that has the bench's control interface and the hardware that has the electronic circuit in charge of channel selection, in order to take measurement, and communicate with the control interface, whose limit is the current capacity delivered by the computer USB port that has the user interface, limiting the system to 5 V and a maximum consumption 500 mA.

For the structural design, the minimum required space that the bench should have was defined, taking into account the electronic circuit (hardware) and the control interface dimensions. The design was defined under a Computer Aided Design (CAD) environment of the box containing the devices and supporting the ports and harnesses for connection to the GCU. This design can be seen in Fig. 5.

#### 4.3.4. Design evaluation

The design was evaluated through ESAVE's model contemplated for the development of aviation technology innovation projects, where the DfX is specified as a tool for evaluating quality and decomposition of the product through design for manufacturing (DfM) [6].

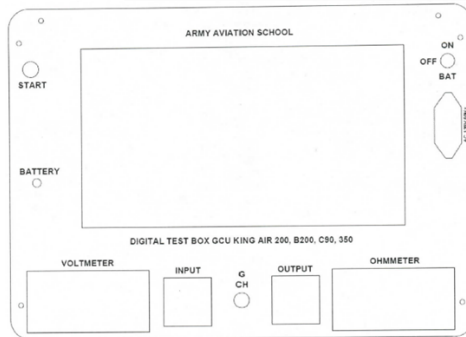


Figure 5. Detailed design bench front.

## 4.4. Development

The construction phase included the structure manufacture, hardware, software, and the integration of these two through the previously defined communication protocol.

### 4.4.1. Hardware development

The previously designed elements such as the box containing the test bench, the electronic board, and the power module were integrated into the hardware development. The electronic board and the computer that contains the bench's control interface were made based on the previous structural design. Likewise, the structural manufacture was limited to the Aircraft Battalion body of technicians and engineers observations, concerning the material, protection index, and thermal and electrical insulation. All hardware was developed by engineers of the research group in military aviation, which belongs to ESAVE. It was necessary to design four test bench models and evaluate them using the Pugh method and innovation indexes (automation, availability, security, connectivity, resistance, aesthetics, portability, ergonomics, adaptability, and maintainability).

### 4.4.2. Software development

In this stage, the communication protocol programming on the microcontroller (UART) was developed, which determines the measurement channels using a reception code for selection. This code is transmitted by the portable electronic device. Once the communication protocol was determined, and the microcontroller in charge of interpreting and executing the activation of the 16-channel relay (one at a time) and the measurement (voltages or impedances) was selected. It was developed in C++ language, the software that takes care receiving the communication frame, according to the protocol table, where the message type is identified for the activation or closure of the different relays, as well as the name or numerical hardware identification in charge of executing the orders and the software that issues the control sentences. For the GUI development, National Instruments' popular LabVIEW® development software package was used for testing, measurement, and control applications.

#### 4.4.3. HW/SW integration

The integration was performed with the code installation on the mobile device of the user interface that allows controlling the test sequence, data acquiring and processing, and saving the reports. This interface that includes the channel manual selection and measurement type, in case the bench operator needs to know specifically the voltage or impedance of a specific channel, as well as an automatic option that tests all 16 channels according to the procedure established in aircraft maintenance manual, section 24-00-31. In the software, a database must be integrated that includes the standard measurement parameters of each channel, both for voltage and impedance, where the obtained measurement is compared with the standard measurement for each channel to determine the GCU unit use or replacement, detailing the channels result, aircraft identification, and test date and time. At the troubleshooting test end, the software delivers a report with the information previously described in PDF format. The final graphical interface can be seen in Fig. 6.

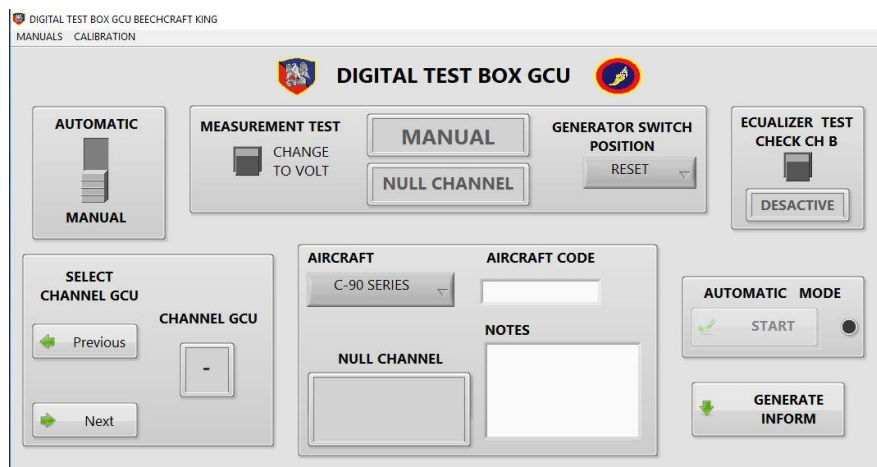


Figure 6. Graphical User Interface.

#### 4.4.4. Structural assembly

The structure and materials of the bench were approved by the Aircraft Battalion No. 1. In this stage, the assembly of harnesses, connectors, electronic board, and the computer was carried out. At first, it was necessary to carry out the fastening of the connectors, harnesses, power button, and 110 VAC power input, followed by the installation of the electronic board and the computer that supports the control interface. Fig. 7 shows the result of the assembly.

#### 4.5. Validation

For the validation process, the prototype was provided to BAMAV No.1 so that tests could be carried out, together with technical operators, on the available Beechcraft King C-90, 200, B 200, 300 and 350 series aircraft. The maintenance manager was asked to elaborate a technical report to



Figure 7. Test bench assembly (final result)

validate the bench results, and he was asked to make tests for troubleshooting with the test bench established by the ATA manual, in order to compare resource use and time between the created bench and the current measurement protocol. The approval criteria were:

- A. Field tests: a test plan was made with the Beechcraft King C-90, 200, B 200, 300 and 350 aircraft GCU under operating conditions in maintenance shops. To check this, the maintenance personnel was allowed to make final adjustments and correct the generated noise in the signals and other disturbances. Also, conducting the tests serves as an instrument to verify compliance with the requirements set out in the initial phase.
- B. Test results analysis: the sequential behavior and the individual restart of each test allows visualizing the impedance and voltage values. As evidenced by the maintenance manager technical report, this ensures the validity of each test.
- C. Innovation analysis: using the integrated IIP model made it possible to verify the innovation of the product. In this case, the project had a structural approach, going beyond product development, thus allowing the generation of new knowledge and the optimization of organizational processes [10]. The innovation indexes evaluated was the process automation, availability, security, connectivity, resistance, aesthetics, portability, ergonomics, adaptability, and maintainability.

## 5. Results and discussion

Once the troubleshooting digital test bench for the Beechcraft King C-90, 200, B 200, 300 and 350 aircraft's GCU was developed and approved by the Department of Avionics of the First Aircraft Maintenance Battalion, the development was delivered to BAMAV No. 1, for certification and implementation.

### 5.1. Channel isolation and channel selection

The tests confirm that the test bench measurement channels are duly isolated from each other, allowing the measurement to be taken on each channel independently without affecting or altering the others. Moreover, the equalizer test in the active state places the channels G and E in direct

contact (impedance equal to 0,00 ohms, ruling out the measurement line impedance) as specified for this test in the ATA 24-30 manuals. [1]. Table II shows the impedance values greater than 10 MΩ for each of the channels when the references (REF) are A, B, C, D, E, F, G, and H. The rest of the channels must be in open circuit. The Fig. 8 shows a measurement channel “A”; once in the ConFg section, it establishes a short circuit between the “G” ground ports and the “A” port of the connector.



Figure 8. GCU troubleshooting bench, measure channel “A” example

Table II. Impedance values in voltage test (channels A, B, C, D, E, F, G, H).

CH	A <sup>a</sup>	B <sup>a</sup>	C <sup>a</sup>	D <sup>a</sup>	E <sup>a</sup>	F <sup>a</sup>	G <sup>a</sup>	H <sup>a</sup>
A <sup>b</sup>	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
B <sup>b</sup>	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
C <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
D <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
E <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
F <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ
G <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ
H <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF
J <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
K <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
L <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
M <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
N <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
P <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
R <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
S <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ

<sup>a</sup>These values correspond to the test channels (A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, P, R, S).

<sup>b</sup>This column corresponds to the impedance test channels (A, B, C, D, E, F, G, H) labeled as REF.

Table III shows the impedance values greater than 10 MΩ for each of the channels when the references (REF) are J, K, L, M, N, P, R, and S. The rest of channels must be in open circuit.

## 5.2. Voltage and impedance measurement tests

The ATA manual states that the voltage measurement ratio for the GCU troubleshooting process is 1 % or 0,01 V. According to this parameter, the test bench complies with the measurement (0 V,

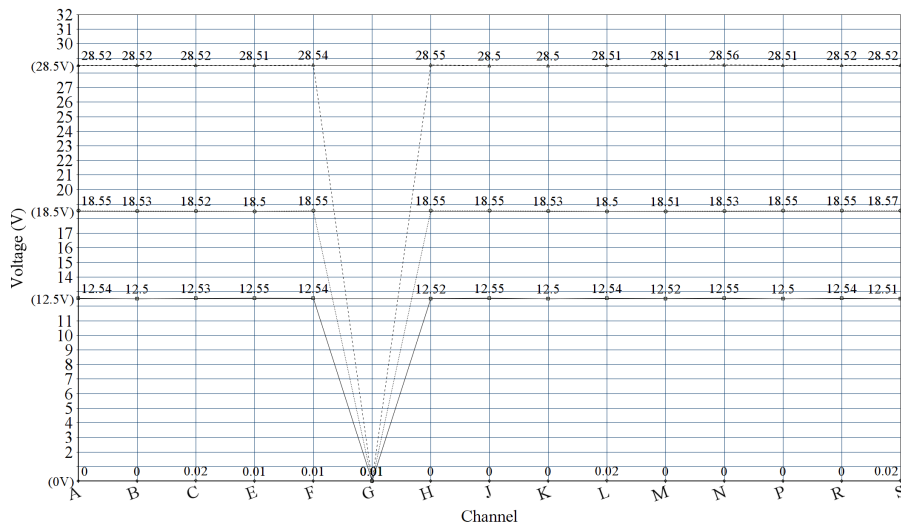
12,5 V, 18,5 V, 28,5 V) and resolution parameters established by the manufacturer. Additionally, the voltage measurement acquired by the bench is compared with a voltage source (10894 calibration certificate (MPL3303 S / N D02200602982)) with a digital voltmeter (10794 calibration certificate (ET-2907 S / N 80200239)), with calibration certificates of less than one year, thus validating that the measurement is within the expected real parameters. In Fig. 9 the control graph of the voltage results from taking protocol for 4 measurement standards clearly the Ground Channel G has 0 V.

**Table III.** Impedance values in voltage test (channels J, K, L, M, N, P, R, S).

CH	J <sup>a</sup>	K <sup>a</sup>	L <sup>a</sup>	M <sup>a</sup>	N <sup>a</sup>	P <sup>a</sup>	R <sup>a</sup>	S <sup>a</sup>
A <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
B <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
C <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
D <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
E <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
F <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
G <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
H <sup>b</sup>	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
J <sup>b</sup>	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
K <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
L <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
M <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ
N <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ	> 10 MΩ
P <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF	> 10 MΩ
R <sup>b</sup>	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	> 10 MΩ	REF

<sup>a</sup>These values correspond to the test channels (A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, P, R, S).

<sup>b</sup>This column corresponds to the impedance test channels (J, K, L, M, N, P, R, S) labeled as REF.



**Figure 9.** Voltage result for standard values (0 V, 12,5 V, 18,5 V, 28,5 V)

### 5.3. Resource use (time, personnel, fuel)

Under laboratory tests and aircraft impedance reading tests, the GCU review can be carried out in just 5 minutes, which, in addition to the time it takes to generate an engine cycle (engines at 70 %, on and off), executes the entire test in just 26 minutes, with a time reduction of 81,6 %, requiring only one technician to connect the bench and run the test. The reduction in fuel consumption when performing the GCU troubleshooting test is directly related to the reduction in time, which allows obtaining a final consumption of JET A1 fuel of 43 gallons (average according to the aircraft analogue indicator), which represents an 86,66 % decrease in fuel.

### 5.4. Technical concept

Considering the technical concept of BAMAV No.1 regarding the prototype validation and according to the results, it is determined that the troubleshooting digital portable test bench for the Beechcraft King aircraft's GCU (Generator Control Unit) is a functional and fully operational prototype for the troubleshooting procedure ordered by the aircraft series' maintenance manual.

### 5.5. Financial evaluation

The approximate development cost is approximately US\$ 3108. With the conventional measurement process, approximately 246,4 gallons of Jet A1 fuel are used, which corresponds to US\$ 377, whereas, with the developed test bench, the consumption is 43,12 gallons (US\$ 65). Therefore, it is economically convenient to use the test bench maintenance activities.

## 6. Conclusions

The procedure for taking measurements on the 16 lines of the GCU connector established by the maintenance manual of the series of aircraft in question involved uncomfortable and non-ergonomic maneuvers for the technicians. Thanks to the new digital test bench development, it only requires the connection of measurement harnesses by the operator, significantly improving the comfort of the technician when carrying out this type of tests.

Once the digital bench completes the troubleshooting test, a report is generated comparing the result obtained with the standard established for the aircraft for each of 16 channels, which facilitates and allows the operator to determine which channel is defective and the voltage deviation or resistance as a detected fault result. As a suggestion for future implementations or improvements to the developed bench, the technical staff of the Maintenance Battalion recommends repositioning the HMI component to the front of the case, and enlarging the screen to 15 inches to facilitate the reading of the measurements manipulate the control interface more easily.

Due to the bench's mobility, GCU reviews can be carried out outside the Maintenance Battalion hangars (operations area). However, it is recommended to implement a USB port in the future, to store the final report obtained through the bench in an easily transportable magnetic medium, since the bench currently stores this information on its local disk and in the cloud when an internet connection is available.



## 7. Acknowledgment

This research was carried out thanks to the collaboration of the Aircraft Maintenance Battalion No. 1 and the Aviation School of the Colombian National Army, who contributed the resources for the development of the prototype, as well as the the maintenance technicians, who agreed to validate the test bench implementation. This project was funded by the National Army of Colombia, Department of Science and Technology, under internal code No. 118315.

## Referencias

- [1] King Air series B200 Aircraft ATA 24 Manual, *FlightSafety International*, Flushing, NY, USA, 2014. ↑394, 396, 397, 398, 405
- [2] T. A. Lima, G. Lynn, P. Barber, J. Churchill, and K. Dalphonse, “Method and apparatus for automatically testing and evaluating electric generator sets”. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US5949247A/en?q=US5949247A> ↑396
- [3] J. M. Bourgeois, B. Cantin, D. Fournier, F. Leonard, and Y. Roy, “Detección, localización e interpretación de una descarga parcial”. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/ES2372021T3/es?q=ES2372021T3> ↑396
- [4] A. P. Goldstein and M. Kearney, “Know when to fold ‘em: An empirical description of risk management in public research funding”, *Res. Pol.* vol. 49, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.103873> ↑399
- [5] H. Ahn, H. Kim, and H. L. Choi, “Integrated Risk Management Method Development for Multiple Aerospace Projects Using a Single Index Expression”, *Int. J. Aero. Sp. Sci.* vol. 19, no. 4, pp. 1052–1062, 2018. <http://doi.org/10.1007/s42405-018-0092-5> ↑399
- [6] C. Cabrera, F. Garay, D. Contreras, and O. Gómez, “Modelo para el desarrollo de proyectos de innovación en tecnología para la aviación: Caso de estudio banco de pruebas digital para las pruebas caza fallas de la GCU de la aeronave Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 y 350”, acceptance letter, 2020. ↑399, 400, 401
- [7] P. J. Rojas, “Doctrina Damasco: eje articulador de la segunda gran reforma del Ejército Nacional de Colombia”, *Rev. Cien. Gral. J. María Córd.* vol. 15, no. 19, pp. 95-119, 2017. <https://doi.org/10.21830/19006586.78> ↑399
- [8] King Air series B200 Aircraft ATA 74 Manual, *FlightSafety International*, Flushing, NY, USA, 2019. ↑399
- [9] D. Wyatt, *Aircraft Electrical and Electronic Systems*. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2009. <https://doi.org/10.4324/9780080942971> ↑399
- [10] P. Savioz and E. Sannemann, “The concept of the integrated innovation process”, in *PICMET '99: Portland Int. Conf. on Man. Eng. Techn. Proceedings Vol-1: Book of Summaries (IEEE Cat. No.99CH36310)*, Portland, July 1999. ↑404

---

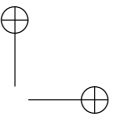
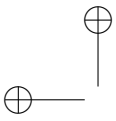
### Carlos Arturo Cabrera Arias

Electronic Engineer, Los Libertadores University Foundation; researcher at the Aviation School of the Colombian National Army. He belongs to the group in military aviation as a researcher in Bogotá, Colombia.  
Email: [cienciatecnologia.esave@cedoc.edu.co](mailto:cienciatecnologia.esave@cedoc.edu.co)

---

### Fabián Steven Garay Rairan

Electronic Engineer, Francisco José de Caldas District University; project management specialist from the Pilot University of Colombia; junior researcher of Sciences; researcher and teacher at the Aviation School of the Colombian National Army; advisor to science and technology projects at the Infantry School. He belongs as a researcher to the group in military aviation and to the CISI group; Bogota, Colombia. Email: [fabiangarayrairan@cedoc.edu.co](mailto:fabiangarayrairan@cedoc.edu.co)



---

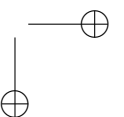
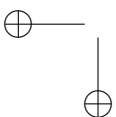
### **Ingrid Arango Calderón**

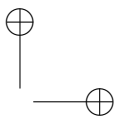
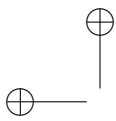
Logistics administrator and professional in military sciences, José María Córdova Cadet Military School; police aviation specialist, Police School of Aviation; teacher and science and technology officer at the Aviation School of the Colombian National Army. She belongs to the military aviation group as a researcher in Bogotá, Colombia.  
Email: [cienciatecnologia.esave@cedoc.edu.co](mailto:cienciatecnologia.esave@cedoc.edu.co)

---

### **Óscar Edilson Gómez Vargas**

Professional in military sciences, José María Córdova Cadet Military School; aspiring Master in project management; teacher and science and technology officer at the Aviation School of the Colombian National Army. He belongs as a researcher to the military aviation group in Bogotá, Colombia.  
E-mail: [cienciatecnologia.esave@cedoc.edu.co](mailto:cienciatecnologia.esave@cedoc.edu.co)





## Application of a Supervised Learning Model to Analyze the Behavior of Environmental Variables in a Coffee Crop

*Aplicación de un modelo de aprendizaje supervisado para analizar el comportamiento de variables medioambientales en un cultivo de café*

**William Ruiz Martínez**<sup>1</sup>, **Roberto Ferro Escobar**<sup>2</sup>, **Javier Felipe Moncada Sanchez**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Corporación Unificada Nacional de Educación superior (Bogotá-Colombia), <sup>2</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá -Colombia)

correspondence email : william\_ruizmar@cun.edu.co, rferro@udistrital.edu.co, jfmoncada@udistrital.edu.co

Recibido: 01/06/2020. Modificado: 31/08/2020. Aceptado: 15/09/2020.

### Abstract

**Context:** The collection and storage of data on environmental variables in a coffee crop, through wireless sensor networks allow the transformation of said data and the application of a supervised learning model to establish its behavior.

**Method:** For the present work, an architecture of 3 wireless sensor nodes was developed. Each node consists of a Lucy3 programmable card, to which the temperature, environmental humidity, and soil moisture sensors were connected. The measurement terrain is located in El Cortijo coffee farm. Measurements were made over a period of two weeks, three hours a day, sending the information from the nodes described above to a gateway that then transmitted the information to a base station. Finally, the data was loaded on an online platform for transformation and predictive analytics through a supervised learning model.

**Results:** The tests allowed demonstrating the effectiveness of the design of the wireless network in the collection and transmission of data. It was later found that the application of the supervised learning model through the analysis of classification with decision trees allowed predicting the behavior of the variables, which were evaluated in specific time frames and conditions.

**Conclusions:** By applying predictive models, the conditions of the crop can be improved, allowing the yield of the analyzed variables to be optimized, thus minimizing the loss of resources and improving the efficiency of processes such as sowing and harvesting the grain.

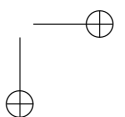
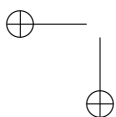
**Keywords:** wireless sensor network, supervised learning model, precision agriculture, decision trees

**Language:** English.

### Open access



Cite this paper as: W. Ruiz Martínez, R. Ferro Escobar, J. Moncada Sanchez, "Application of a Supervised Learning Model to Analyze the Behavior of Environmental Variables in a Coffee Crop", INGENIERÍA, vol. 25, no. 3, 410-424 (2020).  
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
DOI: [doi:https://doi.org/10.14483/23448393.16898](https://doi.org/10.14483/23448393.16898)



### Resumen

**Contexto:** La recolección y almacenamiento de datos sobre variables medioambientales en un cultivo de café mediante el uso de redes inalámbricas de sensores permiten transformar dichos datos y aplicar un modelo de aprendizaje supervisado para establecer su comportamiento.

**Método:** Para el presente trabajo, se desarrolló una arquitectura con 3 nodos sensores inalámbricos. Cada uno consistía en una tarjeta programable Lucy3, a la cual se conectaron sensores de temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo. El terreno de medición se encuentra ubicado en la finca de café El Cortijo, y las mediciones se realizaron durante un período de dos semanas, tres horas al día, enviando la información de los nodos descritos anteriormente a un *Gateway* que luego transmitió la información a una estación base. Finalmente, los datos se cargaron en una plataforma en línea para transformación y análisis predictivo a través de un modelo de aprendizaje supervisado.

**Resultados:** Las pruebas realizadas permitieron demostrar la efectividad del diseño de la red inalámbrica en la recolección y transmisión de datos. Además se encontró que la aplicación del modelo de aprendizaje supervisado a través del análisis de clasificación con árboles de decisión permitió predecir el comportamiento de las variables evaluadas en plazos y condiciones específicas.

**Conclusiones:** Mediante la aplicación de modelos predictivos se pueden mejorar las condiciones del cultivo, lo que permite optimizar el rendimiento de las variables analizadas, minimizar la pérdida de recursos y mejorar la eficiencia de procesos como la siembra y la cosecha del grano.

**Palabras clave:** redes de sensores inalámbricos, modelos de aprendizaje supervisado, agricultura de precisión, árbol de decisión

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

Farming has been established as one of the areas where wireless sensor networks (WSN) have been implemented with great acceptance and success.

This kind of technology aids in the reduction of water consumption and the use of pesticides and fertilizers, as well as favoring the preservation of ecosystem. Additionally, it allows generating alerts about the arrival of frost, floods, fires, etc. Precision agriculture covers multiple practices related to the management of crops, trees, flowers, plants, livestock, among others. [1]. In this sense, an important agricultural sector in our country, such as coffee, can work closely with technology and provide a new vision and projection towards agricultural productivity. On the other hand, it can generate innumerable benefits destined to increase the performance of production processes and optimize the final result of the harvested products.

Among the most interesting applications of precision agriculture is pest and disease control. By means of strategically located sensors, a number of parameters can be monitored, such as temperature, relative humidity, soil moisture, leaf temperature and humidity, and solar radiation, among others, in order to quickly detect adverse situations and establish early treatments. The great advantage of using this technology is early detection and the optimal application of pesticides only in areas where it is really necessary [2].

However, like all crops, coffee is exposed to a set of environmental variables such as temperature, soil type, air humidity, rain, and the wind index, in addition to pests such as the drill bit and rust, which end up affecting grain quality and production [3].

Colombia is known for producing the best soft coffee in the world. One of the statistics that most worries coffee growers and the guilds in charge of their commercialization are grain exports. If you look at the last year in coffee production (as of March, 2020), Colombia reached 14.3 million bags. Likewise, The Federation's statistics show that when comparing the periods from October, 2018 to March, 2019 with October, 2019 to March, 2020, which corresponds to a section of the coffee year, the harvest is 6 % higher. "From the point of view of the price of coffee, we are in a historical moment, but with some important challenges in the harvest, which implies what will come in the future on the subject of coffee with the arrival of this pandemic", Added Vélez, who stressed that, in the midst of the quarantine, the consumption of this product in Colombian households has increased by 25 % [4].

Currently, with information and communication technologies, significant advances have been made in the collection, analysis and distribution of information related to the state of the weather, monitoring of environmental variables, and biodiversity studies, among others. This information has different purposes, such as the digital preservation of data, its graphic representation, and the modeling of weather patterns. Some initiatives focus on improving the people's quality of life by obtaining and estimating factors that affect the human environment, for example, infrastructure and transportation, agriculture, and data on the biodiversity of the observed site, among others [5].

That is why there are innumerable drawbacks when optimizing harvesting and production processes, since this sector has not received the necessary attention for many years. Our country has great agricultural potential, but government support is scarce or nonexistent, in addition to other factors such as the high price of inputs and fertilizers and the high rates at which money is lent to coffee growers. These conditions end up discouraging investment in grain harvesting and cultivation processes. Therefore, it becomes evident that, with the rise of new technologies, industrial processes in fields such as agriculture can be improved and automated.

Taking the landscape described above as reference, a collection of data on the main environmental variables that are significant in the cultivation of coffee in a specific land area is proposed. This is carried out by means of a wireless sensor network (WSN) Through a wireless sensor network (WSN). Then, later said data will be uploaded to a cloud computing platform (Ubidots), where the data sent by the sensor nodes will be received. As a final stage, the data will be uploaded through CSV files generated by Ubidots to the BigML platform, where a supervised learning model will be applied to evaluate said information using decision trees. This valuable information will allow coffee growers to establish and predict the behavior of environmental variables such as temperature, soil moisture, and relative humidity, in order to make decisions regarding the allowed parameters vs. the collected information, in addition to considering said information as danger factors in the development of diseases or factors that represent hazards to crops and that have a direct impact on processes like harvesting and the preservation of natural resources.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Research methodology

For the development of this research, the following phases have been proposed:

1. **Design and configuration of the WSN:** In this phase, the logical and physical design of the sensor network is carried out. In the logical design phase, the network design is designed according to the selected topology, a star, in this case, since it is the most efficient topology with a fast implementation speed. Next, in the physical design phase, each of the devices will be located in their designated place. Finally, the configuration of each of the sensor nodes with their respective measurement and communication elements is carried out; the Gateway and the base station are configured to act as intermediaries between the data sent by the sensors and the cloud platform.
2. **Collecting and sending data:** The data collection tests will be carried out through the different nodes and its sensors. The data is then sent to the Gateway and from there to the base station. Thus, the continuity of the information and the appropriate format are verified.
3. **Sending data to the IoT platform:** The data is sent from the base station to the Ubidots platform.
4. **Uploading data to the Machine Learning Platform:** Once the data is uploaded to the Ubidots platform, a CSV file is downloaded which contains the information sent by the sensor nodes. This file is uploaded to the BigML machine learning platform, and it will be our input for data analysis phase.
5. **Data transformation and model application:** Once the CSV file is loaded on the BigML platform, the dataset is created. Then, a field is taken as a pivot to serve as reference for the model, and the supervised model is applied through classification with decision trees. The model is then launched, and the confidence percentage associated with the predictive model is evaluated. Finally, we determine whether the model meets the initial expectations. Fig. 1 shows the phases in which the research has been structured.

### 2.2. Architectural design of the system

A WSN is a network consisting of distributed autonomous devices, which uses different kinds of sensors to monitor physical or environmental conditions. This kind of system incorporates a Gateway, which provides wireless connectivity as a complement of wired networks and distributed nodes. The selected wireless protocol depends on the application requirements. Some of the available standards include 2,4 GHz radios based on IEEE 802.15.4 or IEEE 802.11 (Wi-Fi) standards or proprietary radios, which are regularly 900 MHz [6].

The proposed architecture for the development of the WSN system consists of three sensor nodes [7], each consisting of a Lucy 3 programmable card, connected to temperature, environmental

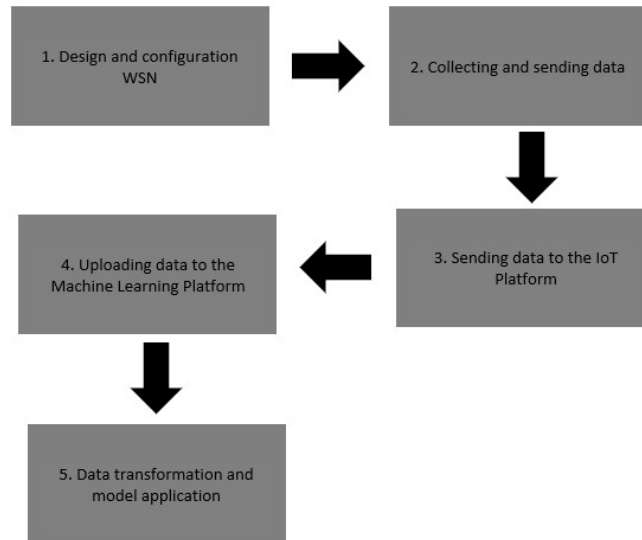


Figure 1. Phases of the research proposed for the development of the project.

humidity, and soil humidity sensors. These nodes is at a distance of 100 m from each other, covering a total area of 300 m<sup>2</sup> of coffee cultivation. The nodes also communicate wirelessly through the ZigBee protocol with the Xbee modules. The architecture of the proposed system can be seen in Fig. 2.

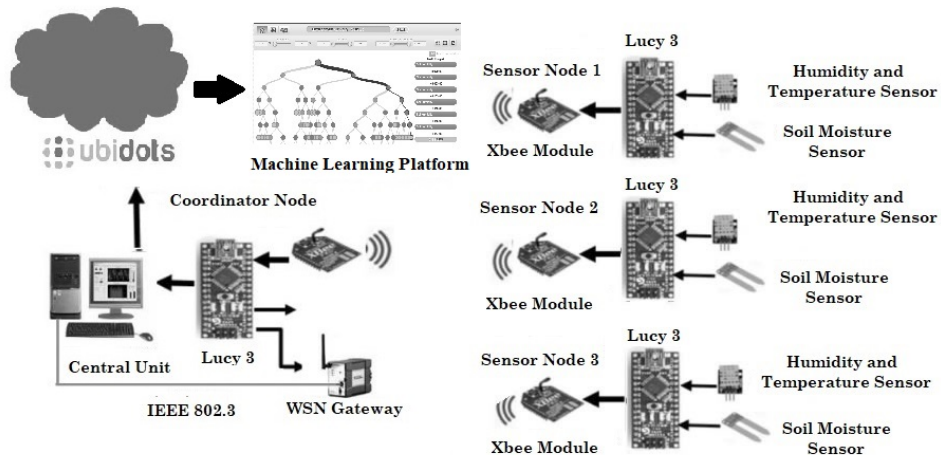


Figure 2. Architecture of the wireless sensor network and Cloud platforms.

The Gateway is responsible for coordinating and communicating the sensor nodes with the base station through the 802.3 standard. Finally, the data collected by the sensors is sent to a central unit or base, where it will then be uploaded to the cloud platform (Ubidots), which is in charge of receiving the information from the base station to store and processing it. Subsequently, a CSV file is downloaded from the platform. This input is uploaded to the BigML platform, where it will go to the information analysis phase and the application of the supervised learning model, which will allow decision-making regarding the behavior of the environmental variables in the crop and their respective corrective measures. Table I shows the different measurement ranges of the TEGR-101 soil moisture sensor [8].

**Table I.** Dryness or humidity conditions measured by the TEGR-101 soil moisture sensor.

Soil Condition	% Humidity	Output Voltage
<b>Dry</b>	10 %	40 mV
	20 %	400 mV
	30 %	1,08 V
<b>Wet Medium</b>	40 %	1,80 V
	50 %	2 V
	60 %	2,32 V
<b>Damp</b>	70 %	2,40 V
	80 %	-
	90 %	-
	100 %	-

For the communication section between sensor nodes and the Gateway, we found several standards that meet the necessary characteristics and conditions, but the ZigBee 802.15.4 protocol or standard was selected, mostly due to economic factors. The ZigBee Alliance (ZigBee Alliance) [9] consists of an association of industries that work together to develop standards and products. ZigBee is the name of the specification for a set of high-level wireless communication protocols for use in low-consumption digital broadcasting applications based on the IEEE 802.15.4 standard for wireless personal area networks Network or WPAN). ZigBee technology is integrated into a wide range of products and applications for commercial, industrial, and government consumers.

The implementation of the WSN will be carried out in a 300 m<sup>2</sup> area of a coffee crop in El Cortijo farm, located in the town of Pueblo Tapao, a district of Armenia (Quindío). Table II shows the description and physical characteristics of the terrain.

### 2.3. Internet of things and machine learning platforms

For the development of this research we used two Internet platforms with different purposes:

1. Ubidots, an Internet of Things (IoT) platform in charge of managing the information received by each of the sensor nodes.



- The BigML platform, a machine learning platform, in charge of receiving the data in a CSV file, transforming the loaded data into its own DataSet for a subsequent analysis through the application of a supervised model, namely a classification model based on decision trees.

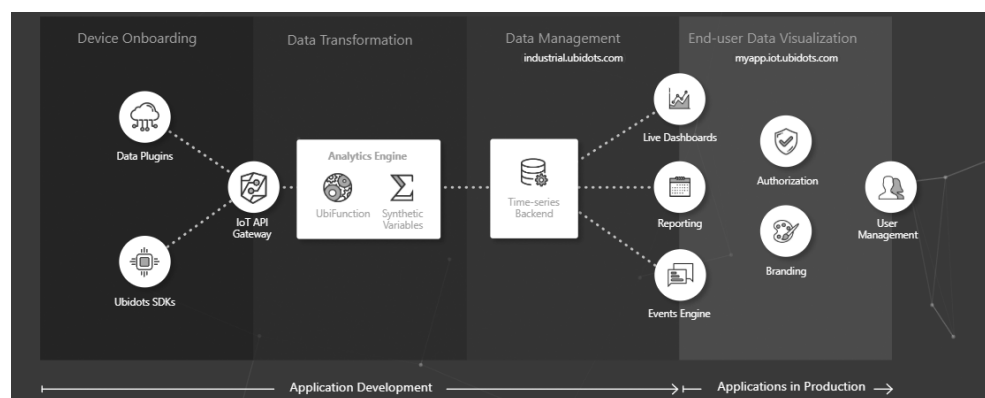
**Table II.** Physical description of the farmland.

Characteristics	Description
Location:	Sidewalk “La María” 5 km from the city of Armenia and 1,0 km from Pueblo Tapao.
Average Temperature:	19-22 °C
Cultivation Area:	Half a hectare
Type of Crop:	Arabic Coffee

### 2.3.1. Ubidots (IoT platform)

Ubidots is a production-ready cloud for data collection, analysis, and visualization. This platform has advantages that make it stand out from the rest. Among the main features, there is an API and protocols that can be connected from any hardware to the Ubidots cloud through HTTP, MQTT, TCP, UDP or Parse (custom protocol).

Regarding the presentation board, data can be analyzed in real time because the platform creates pictures. Therefore, the devices and the information they collect can be controlled. Additionally, the platform has a user management feature, which helps organize permissions and restrictions depending on the operator or end user. Other features are sensor communication (input/output), API creation, extended monitoring, and data analysis of API applications of all kinds. On the other hand, its data storage depends on the acquired plan, back-end possibilities, and daily visualization of the stored data. The data output is called scheduled reports and is delivered in PDF or Excel formats. A delivery can be scheduled for anyone who needs it. In Fig. 3, the different services offered by the Ubidots platform are shown [10].



**Figure 3.** Services offered by the Ubidots platform.

### 2.3.2. BigML platform

This working environment offers a platform to build and share datasets and models in the form of machine learning as a service (MLaaS). Consequently, BigML is a proposal to make machine learning understandable to users.

BigML manages to exploit the benefits of existing cloud solutions. For example, it allows data import from AWS S3, MS Azure, Google Storage, Google Drive, Dropbox, etc., which benefits developers because public cloud infrastructures could have become a basic need, that is to say, a solution for the providers of various services.

Also, as it is solely focused on machine learning, BigML offers a comprehensive set of features, all well integrated within an interface where the user can load datasets, train and evaluate models, and generate new predictions, one by one or in batches. It contains a wide gallery of datasets and free models to probe, organized in categories, in addition to being accessible to the public. It also contains algorithms for Educational Clues, as well as grouping and selection to create high-quality models [11]. In Fig. 4 the data transformation process can be observed.

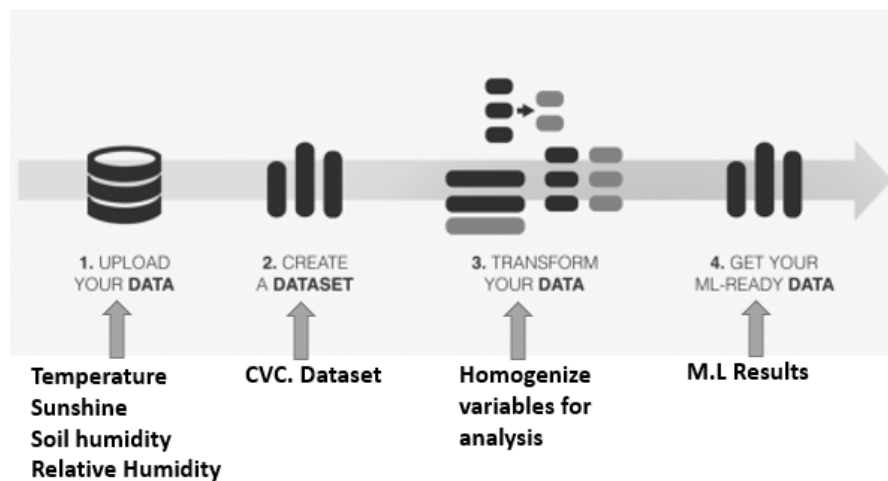


Figure 4. Process of loading and transforming data on the BigML.

### 2.4. Machine learning models

Machine learning [12] involves coding models that automatically adjust performance to agree with the presented data. This kind of learning is achieved through a model where the parameters are automatically adjusted according to certain performance criteria. Machine learning can be considered a subfield of artificial intelligence (AI), and it can be classified into the following application models:

1. **Supervised learning:** it consists of algorithms that learn from a set of training examples, to generalize and label all possible inputs to the set. As technical examples in supervised learning, we have logistic regression, support vector machines, decision trees, random forest, etc.
2. **Unsupervised learning:** it consists of algorithms that learn from an unlabeled training set. Examples of this type of learning are used to explore data according to some statistical, geometric or similarity criteria. Unsupervised learning is present in k-media grouping, grouping, principal component analysis, association detector, anomalies, etc.
3. **Reinforcement learning:** it consists of algorithms that learn through the reinforcement of criticism. It provides information on the quality of a solution, but not on how to improve it. Improved solutions are achieved by iteratively exploring the solution space.

The following phases were applied in the project:

1. *Data understanding:* in this phase, the analysis of data from coffee cultivation was carried out, all the information was correlated with the experiences of coffee growers.
2. *Data preparation:* for this phase, it is important to review the data, refine it, find inconsistencies, create, and verify the variables that are repeated.
3. *Selecting the variable homogenization technique:* in this phase, the most important variables of the coffee crop to be measured were identified. In this case, some variables that are not easy to measure due to cost issues were discarded. One of the discarded variables was the PH measurement, despite its importance.

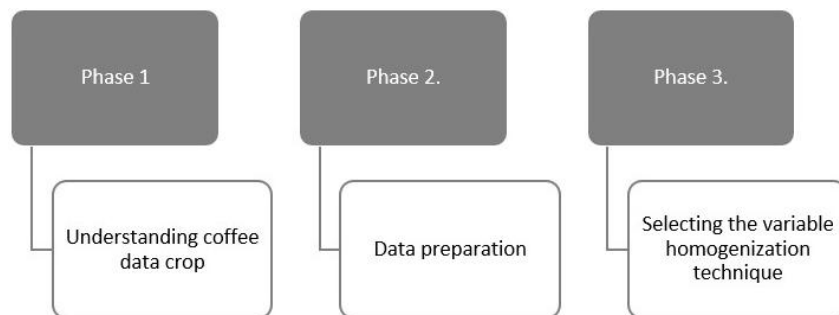


Figure 5. phases applied to the analysis of coffee cultivation data

In this section, it is important to mention that, among the different machine learning techniques, there are also other analysis tools such as neural networks, classification trees, support vector trees, and Bayesian classifiers, which are used to find useful information and make decisions.

## 2.5. Coffee and its environmental conditions

In this section, we intend to present a series of environmental variables that were taken as a reference for the present study. These variables are of great importance in the planting and cultivation of coffee, as well as in its future production:

### 1. Temperature

*Optimal conditions:* The optimal area for growing Arabica coffee is between 19 and 21,5 °C.

*Other conditions:* In cold climates, where the average temperature is below 19 °C, its production is lower, and the harvest is distributed throughout the year. In hot climates, where the average temperature is higher than 21,5 °C, the productive life of coffee is shorter, and the harvest is earlier and more concentrated. Therefore, rust is more severe when it attacks, and there is an increase in pests such as the bit or the miner [13].

### 2. Sunshine and cloudiness

*Optimal conditions:* Colombia is close to the equator and therefore receives abundant solar radiation throughout year. The maximum values that reach the top of the atmosphere occur in March and September and are close to 432 Wm<sup>-2</sup>. The minimums are observed between December and January and are close to 384 Wm<sup>-2</sup>. Due to uneven terrain, there are regions that are exposed to sunlight than others. In mountainous regions, due to horizon restriction, the effective time of sunlight can be reduced by two hours or more. This happens, for example, in coffee regions located in deep valleys [14].

### 3. Soil humidity

*Optimal conditions:* Soil moisture is a function of the distribution of rainfall within the crop, planting density, leaf distribution, the evaporative demand of the atmosphere, the slope of the land, and the physical and hydraulic properties of the soil. Currently, a variety of techniques are available to measure soil moisture directly in the field, without the need to take soil samples and alter their properties [15]. In the coffee zone, organizations such as Cenicafé recommend a humidity of 75 to 85 %.

*Other conditions:* The pH (acidity) suitable for a good coffee crop must be between 5,0-6,0; a pH of less than 4,0 results in problems of Aluminum and Manganese toxicity and Calcium deficiencies. The crop must have adequate levels of Magnesium, Potassium, Sulfur, Boron, Copper, and Zinc.

### 4. Relative humidity

*Optimal conditions:* It is a component of the climate that measures the relationship between a completely watersaturated air and the amount of water vapor at a given moment. Relative humidity is expressed in terms of percentage. Coffee is a plant that grows well in environments with humidity above 75 % without reaching full saturation. Harvesting in regions such as the coffee axis occurs in the months with the lowest relative humidity, which facilitates the handling of the grain [16].

### 3. Discussion and results

It was determined that the Lucy 3 programmable cards in each of the sensor nodes were programmed to receive the values sent by each of the sensors every 10 minutes, in order to send said data to the Gateway and from there to the station base. From there, the information was sent to the Ubidots platform, where the measured values were analyzed, and it was determined whether they were within the established ranges. Comparisons between the received values and the allowed ranges could be established to determine anomalous variations in said measurements. Distance tests were developed to determine the maximum range of the Xbee -Pro S2C wireless modules, to ensure reliable data transmission without loss and signal attenuation. It was thus found that the maximum range is within the established 100 m limit in open field. Fig. 6 shows the data from transmitted variables being measured through the Lucy 3 platform. This information is useful because it can determine if any data was lost or arrived without any error during the broadcast. We can see the DataSet loaded to the BigML platform to apply the supervised model.

Name	Type	Count	Missing	Errors	Histogram
Object_Id	ABC	95	0	0	
TimeStamp	DATE-TIME	0	95	95	
EnvironmentTemperature	123	95	0	0	
EnvironmentHumidity	123	95	0	0	
SoilHumidity	123	95	0	0	
TimeStamp.year	YYYY-MM-DD	0	95	0	
TimeStamp.month	YYYY-MM-DD	0	95	0	
TimeStamp.day-of-month	YYYY-MM-DD	0	95	0	
TimeStamp.day-of-week	M T W T F S S	0	95	0	
TimeStamp.hour	HH:MM:SS	0	95	0	

Figure 6. dataset transformed on the BigML platform.

Applying the supervised model with classification through decision trees, we were able to establish that, as the environmental humidity increases, the number of instances decreases, and the soil humidity remains up to 79,69%. In conclusion, if the humidity of the environment increases, the soil moisture tends to decrease. In Fig. 7, we can see a decision tree taking the environmental humidity variable as a pivot.

By loading the data on the BigML platform, different learning models could be created that allowed us to delve into the analysis of variables such as temperature, ambient humidity, and soil moisture. In the same way, we were able to establish different evaluations and predictions, for example:

- As the day progresses, the ambient temperature logically increases at specific time intervals, but the ambient humidity also decreases.

- On the other hand, as the day passes, the environmental temperature has a greater influence on other variables such as temperature and humidity.
- In another model, soil humidity was taken as a reference variable. It was found that, as the temperature and environmental humidity increase, the number of instances decreased, and soil humidity increased up to 81,16 %. In conclusion, the two previous variables are directly proportional to soil moisture, that is, a higher temperature and relative humidity produce drying out of the ground. In Fig 8, we can see a decision tree taking the soil moisture variable as a reference.

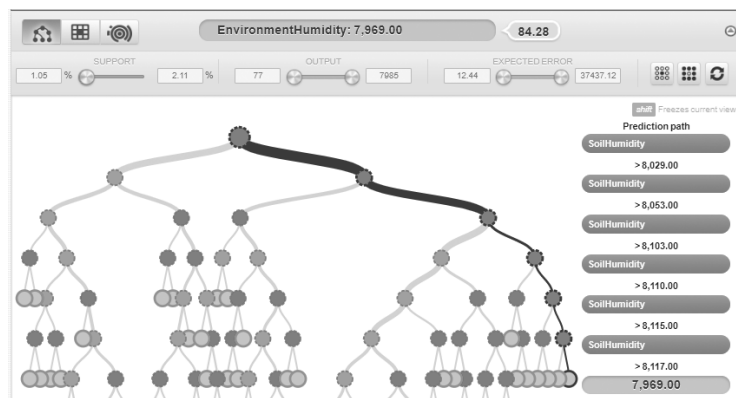


Figure 7. Environmental humidity taken as reference in a decision tree.

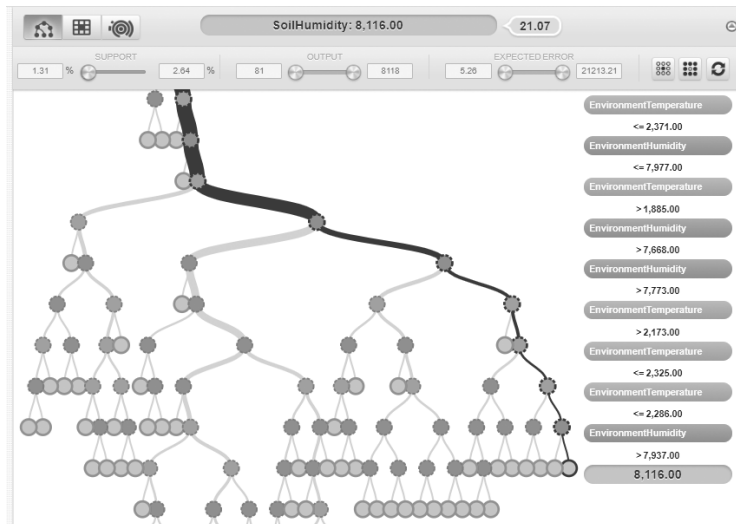


Figure 8. Soil moisture taken as reference in a decision tree.

A training model was executed for the reference dataset, which was measured for 24 hours, as can be seen in Fig. 9. The measurements were made every 10 minutes and an average of 6 measurements was obtained every hour. Once the appropriate parameter was determined by homogenizing the data, the percentages for temperature and relative humidity were compared. According to the ML training, it was found that the greater number of instances in the temperature variable indicates that, if the ambient temperature increases, then the relative humidity tends to decrease. This means that both variables are inversely proportional. Therefore, the system would indicate that it is necessary to water the crop, since the relative humidity must be over a 75 % threshold.

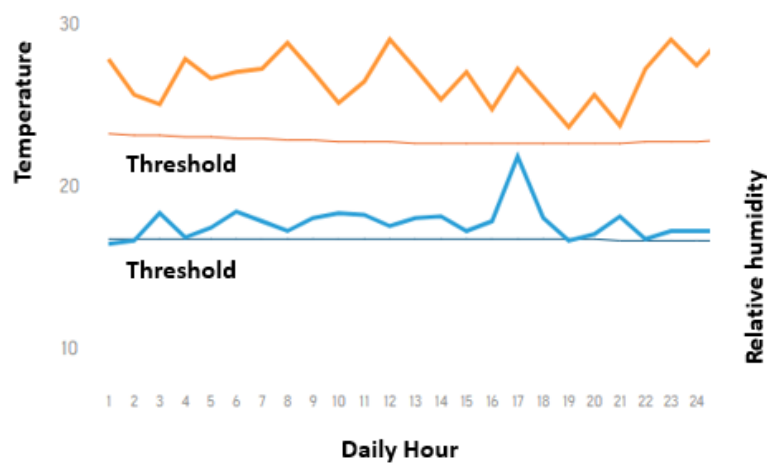


Figure 9. Measurement of temperature and relative humidity for training and decision making in a coffee crop

## 4. Conclusions

The design and configuration of the wireless sensor network met the initial expectations; there were no problems in collecting and transmitting data through the proposed hardware architecture. It could be established that, among the fundamental factors in coffee crops, there is the quality of the soil where the crop is planted, which depends on the growth rate and development of the tree, the start of production, the quantity and quality of the itself, resistance to attack by pests and diseases, and the duration of its productive life.

It was established that the same problem can be treated with different models of supervised learning. There are combinations of decision trees, such as the assembly of repeated samples and random decision forests that can improve the results. Another type of model called logistic regression can also be used for the classification problem. The minimum and maximum parameters to be reached for each of the variables such as temperature, environmental humidity, and soil humidity were established on the Internet of Things platform (Ubidots) in order to compare them with the measurements sent by the node sensors.

Temperature, relative humidity, and soil moisture were found to be variables of great importance in coffee cultivation. On the other hand, through the construction of supervised learning models, periods of time where the temperature decreases or increases could be evinced, which allows optimizing processes such as irrigation. Various supervised machine learning models were built with the purpose of evaluating the behavior of the aforementioned variables. There were two models: one predictive and the other evaluative. Thereupon, comparisons could be made based on previously defined patterns.

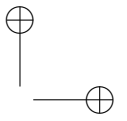
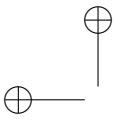
## References

- [1] J. D. Pinto, "Monitoreo de cultivos con redes de sensores Xbee, arduino y dispositivos de medicion de suelos" Thesis, Universidad Tecnologica de Pereira, Pereira, 2015. ↑411
- [2] J. Ordieres, F. J. Martínez, A. de Pisón, A. González, F. Alba, R. Lostado, and A. V. Pernía, *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. La Rioja: Universidad de la Rioja, Servicio de Publicaciones, 2009. ↑411
- [3] K. Siavosh and A. Jaramillo, "Nutricion de los cafetales en Colombia", *Avances Técnicos Cenicafé*, no. 473. <https://www.cenicafe.org/es/publications/AVT0473.pdf>. ↑412
- [4] Portafolio, "El café vuelve a ser el motor de la economía". [Online]. Available: <https://www.portafolio.co/economia/el-cafe-vuelve-a-ser-el-motor-de-la-539712>. ↑412
- [5] M. Quiñones, V. González, R. Torres, and M. Jumbo, "Sistema de monitoreo de variables medioambientales usando WSN y una plataforma cloud", *Enfoque UT*, vol. 7, no. 1, pp. 329-343, 2017. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.139> ↑412
- [6] L. Ramirez, "Diseño de una arquitectura para redes de sensores con soporte para aplicaciones de detección de eventos", Ph.D. Dissertation, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, 2012. ↑413
- [7] National Instruments, "Sensor terminology". [Online]. Available: <https://www.ni.com/es-co/innovations/white-papers/13/sensor-terminology.html> ↑413
- [8] Colmakers, "Colmakers". [Online]. Available: <https://www.colmakers.com/> ↑415
- [9] National Instruments, "Nyantra Documents". [Online]. Available: <https://forums.ni.com/t5/NIYANTRA-Documents/NIYANTRA-2013-REMOTE-MONITORING-AND-AUTOMIZED-CONTROL-SYSTEM-FOR/ta-p/3498027?profile.language=es> ↑415
- [10] Ubidots, "Ubidots". [Online]. Available: <https://ubidots.com/platform/> ↑416
- [11] Bigml, "Bigml". [Online]. Available: <https://bigml.com/features> ↑417
- [12] L. Igual and S. Seguí, *Introduction to Data Science*. Barcelona: Springer, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50017-1> ↑417
- [13] J. C. Garcia, H. E. Posada, and F. A. Salazar, "Factores de producción que influyen en la respuesta de genotipos de *coffea arabica* L. bajo diversas condiciones ambientales en Colombia", *Cenicafe*, vol. 2, no 66, pp. 30-57, 2015. <https://www.cenicafe.org/es/publications/3.Factores.pdf> ↑419
- [14] J. Arcila, "Factores que determinan la productividad del cafetal", in *Sistemas de producción de café en Colombia*. Chinchina: Cenicafe, 2007, pp. 62-86. ↑419
- [15] V. H. Ramírez, "Avances en la medición del suelo *in situ*", *Investigaciones de Unisarc*, vol. 4, no. 1, pp. 27-34, 2006. ↑419
- [16] A. Herron, "Producción del café en zonas no tradicionales". [Online]. Available: <https://www.urosario.edu.co/Mision-Cafetera/Archivos/Zonas-no-tradicionales-antonio-Herron.pdf> ↑419

### William Ruiz Martínez

Master in Strategic Management of Software Engineering, UNINI University of Puerto Rico; project Management Specialist, Autonomous University of Colombia. Systems Engineer, Autonomous University of Colombia; full-time professor at the National Unified Corporation for Higher Education (CUN), belongs to the AXON group as a researcher, classified in the A category in Colciencias  
email: william.ruizmar@cun.edu.co





---

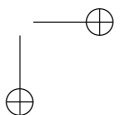
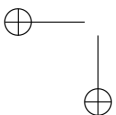
**Roberto Ferro Escobar**

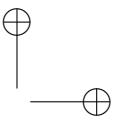
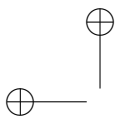
Roberto Ferro Escobar PhD in Computer Engineering, Pontifical University of Salamanca; Master in Teleinformatics, electronic engineer, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; researcher in LIDER and AXON group, classified in the A category in Minciencias, director of the RITA research network.  
email : Rferro@udistrital.edu.co

---

**Javier Moncada Sánchez**

Master's in information sciences and communication, Catastral engineer, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; researcher in LIDER group in the National Unified Corporation for Higher Education (CUN), classified in the A category in Minciencias.  
email: jfmoncada@udistrital.edu.co





Research

REVISTA  
Ingeniería

## Design and Prototyping of an Electronic Cane for an Indoor Guide System for the Blind

*Diseño y prototipado de bastón electrónico para un sistema de guía en interiores para invidentes*

**Arnaldo A. González-Gómez**<sup>1</sup>, **Yesid Díaz-Gutiérrez**<sup>1</sup>, **Wilson D. Flórez-Barboza**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Corporación Unificada Nacional de Educación Superior CUN (Colombia-Bogotá), <sup>2</sup>Corporación Unificada Nacional de Educación Superior CUN (Colombia-Sincelejo)  
correspondence e-mail: arnaldo.gonzalez@cun.edu.co, yesid.diaz@cun.edu.co and wilson.florez@cun.edu.co.

Recibido: 23/06/2020. Modificado: 31/08/2020. Aceptado: 15/09/2020.

### Abstract

**Context:** Blindness is a physical-sensory disability that limits the ability of affected people to carry out daily-life activities and deteriorates their quality of life. It is estimated that there are 296.000 blind people throughout the Colombian territory.

**Method:** This article presents the development of an electronic baton that works with a system of guiding lines and information points, together with an application for mobile devices. This research is based on the quantitative method, seeking to investigate the characteristics of the device in terms of its use. A descriptive investigation is performed which can be classified as *ex post facto*.

**Results:** As a result, a device is developed which can guide a blind person to their destination in closed areas, although the time used for movement is greater compared to a journey with human assistance.

**Conclusions:** There are solutions aimed at guiding a blind person in closed spaces that achieve this goal, although they require bulky hardware, which prevents the dimensions of the device from resembling those of the walking sticks normally used as a tool by the blind population. This limits the natural use of this kind of devices.

**Keywords:** electronic cane, indoor guide, mobile application, visual impairment

**Language:** English

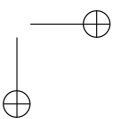
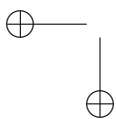
Open access



Cite this paper as: A. González, Y. Díaz, W. Flórez: "Design and Prototyping of an Electronic Cane for an Indoor Guide System for the Blind", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 425-436 (2020).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.16956>



### Resumen

**Contexto:** La ceguera es una discapacidad de tipo físico-sensorial que limita la capacidad de las personas afectadas para realizar actividades de la vida diaria y deteriora su calidad de vida. Se estima que hay 296.000 ciegos en todo el territorio colombiano.

**Método:** Este artículo presenta el desarrollo de un bastón electrónico que funciona con un sistema de líneas guía y puntos de información junto con una aplicación para dispositivos móviles. Esta investigación parte del método cuantitativo y busca indagar sobre las características del dispositivo en cuanto a su uso. Se desarrolla una investigación descriptiva que puede catalogarse de *ex post facto*.

**Resultados:** Como resultado se desarrolla un dispositivo capaz de guiar a una persona invidente a su destino en recintos cerrados, si bien el tiempo utilizado para el desplazamiento es mayor en comparación con un recorrido con asistencia humana.

**Conclusiones:** Existen soluciones orientadas a guiar a una persona invidente en espacios cerrados que cumplen con este objetivo, aunque requieren un *hardware* voluminoso, lo que impide que las dimensiones del dispositivo se asemejen a las de los bastones normalmente usado como herramienta por la población invidente. Esto limita el uso natural de este tipo de dispositivo.

**Palabras clave:** bastón electrónico, guía en interiores, aplicación móvil, discapacidad visual

**Idioma:** Inglés

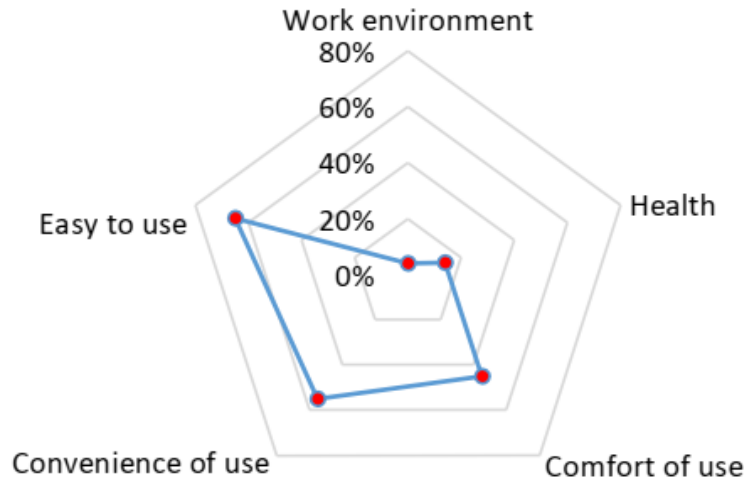
## 1. Introduction

Blindness is a physical-sensory disability that limits the ability of affected people to carry out daily-life activities and deteriorates their quality of life.

The *Analysis of the Visual Health Situation in Colombia 2016 Agreement 519 of 2015* by the Colombian Ministry of Health indicates that, according to what was reported by the World Health Organization (WHO) in their “*Global Data on Visual Impairments of 2010*”, the number of blind people worldwide was 39,365 million. In the Americas (Central and South America) there were 3.211 (8 %) million blind people. Of the total number of blind people, 4 % corresponded to childhood blindness. It is estimated that there are 7.000 blind Colombians for every million inhabitants (296.000 blind throughout the country) [1].

Difficulty in moving autonomously and independently is one of the most common obstacles for people who suffer from visual impairment, a situation that, in addition to affecting their mobility, can cause them to face problems at an emotional level, as well as work and social interaction. However, this population has adopted different technologies to support their daily activities; 65 % of visually impaired people use accessible technologies for their ease of use when performing specific tasks [2]. Figure 1 shows the percentage of people who benefit from the use of inclusive technologies, and the reasons for their use are included in the quantitative data.

In the scientific literature, while searching the databases and metasearch engines, there is background related to the following keywords: cane AND guide AND blind AND (interiors OR “closed enclosure”). This implies a great variety of works that describe various technological solutions such as lenses, vests, and handcuffs, among others. For the sake of agreement, only some solutions that propose devices in the shape of a cane are listed in this article, such as the prototype of a smart cane with sensors for people with visual and physical disabilities, developed at the State Univer-



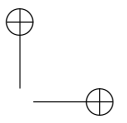
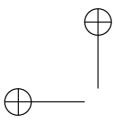
**Figura 1.** Evaluation in quantitative criteria of the use of accessible technologies used by people with visual disabilities and their purpose of use. Source: [2].

sity of South Manabí, which allows detecting obstacles from a distance by means of ultrasound sensors [3]. At the Israel University of Technology, a folding baton with ultrasound radar and GPS positioning was developed to monitor visually impaired people, with Bluetooth connectivity for mobile devices and an accelerometer to verify the correct position of use of the baton. It implemented an ARDUINO module, a battery, an audio device, and a battery charger module, all this together on one PCB [4].

An interesting solution is the implementation of a cane for the blind that can detect obstacles even above the user's waist. This development is based on a PIC 12F675 microcontroller, an HC-SR04 ultrasonic proximity sensor, and audible and vibratory alarm elements. This device was developed at the Universidad de los Llanos in Villavicencio [5]. At the Universidad Católica de Pereira, a functional prototype of a smart cane was created which can help people with visual disabilities in their movement. The prototype generates an alert in the presence of nearby objects, and it has GPS, so that relatives or dependents can monitor the location and route of the person using the cane, through a web application in real-time [6].

The tools described above provide solutions related to the individual's environment and seek to solve the problem of taking the individual from one place to another using tools such as GPS, where the precision of the devices that use this technology limits their use indoors, especially having noted that the accuracy of GPS technology for civilian applications is approximately 3 meters [7].

The article aims to propose an innovative, efficient, and economic solution to the problem of autonomously guiding visually impaired people in closed spaces. It proposes the design and prototyping of an electronic baton for an indoor guidance system for blind people, which consists of an electronic baton, a mobile phone, a software application, guiding lines, and information points in



barcode format. Inside the handle of the baton are the electronics, consisting primarily of a battery charging circuit, a rechargeable battery, a microcontroller, a wireless communication module, and an infrared light sensor inside the tip of the baton. The article aims to raise the answer to the question: Is it possible to meet the objective of independently guiding a blind person to their destination by implementing this kind of system?

## 2. Materials and methods

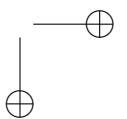
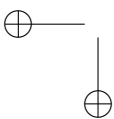
This research is based on the quantitative method and seeks to investigate the characteristics of the device in terms of its use, in order to verify how the device behaves when it is used by a person deprived of the sense of vision. Tests are carried out to validate the behavior of the device, with the purpose of making make decisions regarding its design. Therefore, a descriptive investigation is developed that can be classified as *ex post facto*, which allows identifying attributes of the electronic baton in integration with the interior guidance system during its use.

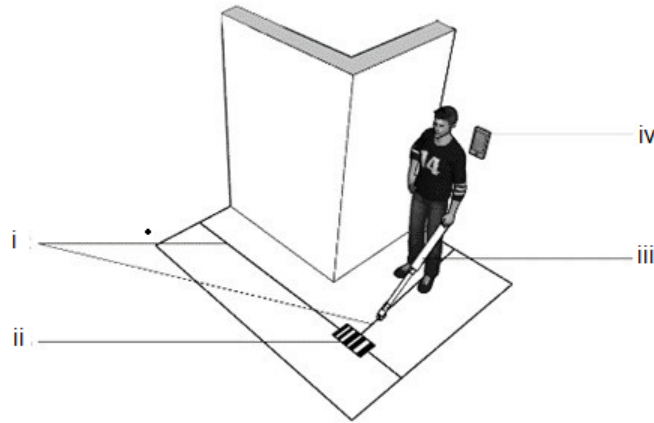
An intuitive use of the device is proposed for its development, that is to say that it must be easy to use, that it can be used without effort, considering the way in which the blind population normally use aid sticks, seeking the most natural use possible. Regarding the physical dimensions, the device has similar characteristics to the aid sticks normally used by the blind population, with the purpose of achieving a feeling of familiarity with the device, which allows easiness in its handling. For this reason, all the electronics of the device are inside the electronic baton.

### 2.1. Design and modeling

Next, the proposed solution is described. Figure 2 illustrates the main components that make up the system of guides in closed spaces for people with visual disabilities, which consists of a series of guides (i) that create a network of routes to the different destinations within the enclosure. At the beginning, at the end and at the intersection points of the network, there are information points (ii) (barcodes) that can be detected through an optical sensor at the tip of the electronic baton (iii), which is connected wirelessly to a mobile device (iv) with a software application that provides audible information to the user.

Figure 3 shows the 3D design of the electronic baton (1) made with a free version of the Sketchup application. The electronic baton consists of a 1 cm diameter aluminum cylinder (5), which connects one of its ends with the sliding tip (2), inside the sliding tip is the infrared light sensor (9), positioned at a maximum height of 5 mm. This distance is justified by operation requirements of the sensor. The sliding tip also contains a 1 cm diameter (10) sphere that facilitates movement with the cane and is self-contained in the sliding tip that surrounds 66,6 % of the volume of the sphere, allowing the sphere to rotate freely in all directions while remaining fixed on the sliding tip. The opposite end of the aluminum tube connects the handle of the cane (3) that contains the electronics, which is joined with the cover of the handle (4). This joint is fixed by coupling screws, forming three cavities inside of the cane handle, where the recharge control system (8), the rechargeable battery or FEM (7), and the electronic control circuit (6) are located. This arrangement allows to connect both circuits to the FEM easily, using less wiring and allows containing the different elec-

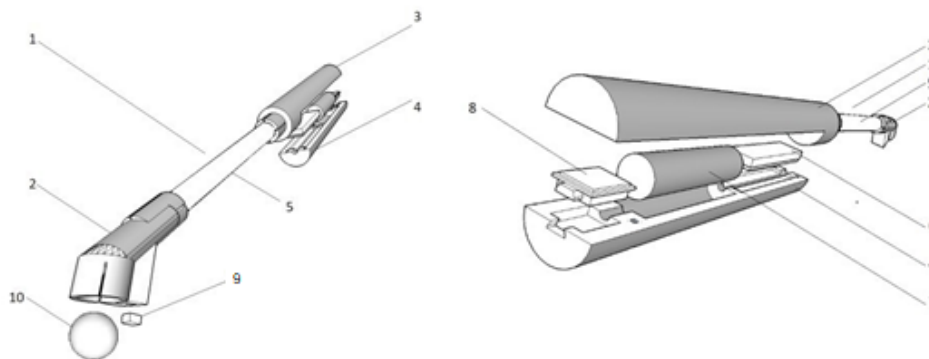




**Figura 2.** Shows a diagram of the elements that make up the guidance system in closed spaces for people with visual disabilities.

tronic components within the handle of the cane, which results in the size of the handle of the cane being comfortable and practically the same as those commonly used by the blind population.

Figure 4 shows the block diagram of the modules that make up the electronics of the device. It has a recharge control system, composed of an integrated charge management module (reference TP4056) [8], a FEM composed of a lithium-ion battery rechargeable, an electronic control circuit composed of an Arduino module with a microcontroller (Atmega reference 328P-MU) [9], a signal conditioning module that provides the infrared light sensor, a wireless connection module (reference HC-05) [10] that allows communication between the microcontroller, and the mobile device that contains the orientation software application. Finally, the module composed of the infrared light sensor (reference QRD1114) [11] is located at the tip of the cane.



**Figura 3.** On the left, a bottom right diagonal view of the main components of the electronic baton. On the right, a top-left diagonal view of the main components of the electronic baton. Both figures are separated to provide information on the construction of the device.

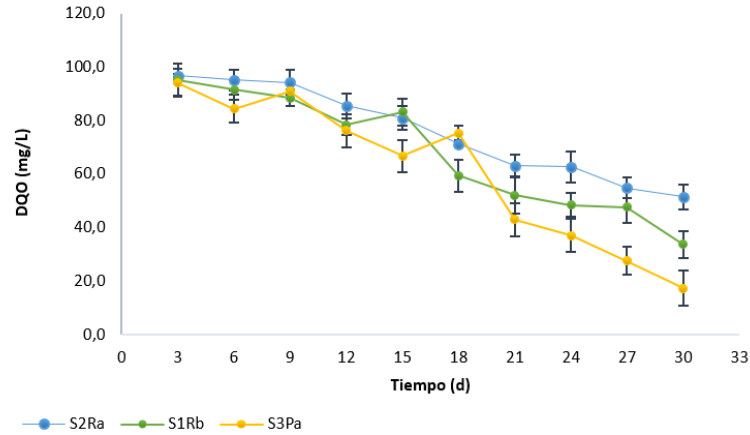


Figura 4. Block diagram of the modules that make up the electronics found in the grip of the cane.

## 2.2. Calculations and technical considerations

The energy consumed by the modules that make up the system according to their technical specifications is summarized below:

Table I. Energy consumed by the modules that make up the system according to their technical specifications.

Device	Voltage	Current
TP4056	5V	150 $\mu$ A
QRD1114	5V	20 mA
Atmega 328P-MU	5V	105 mA
HC-05	5V	50 mA

Below, the calculation of the total power consumed by the system is presented in Equations (1) to (4), for which it must be considered that the system generates a load for its operation which depends on the current or power required by each one of the elements of the system, where  $I_P$  represents the current consumed by the device with reference TP4056,  $I_Q$  represents reference QRD1114,  $I_A$  represents Atmega 328P-MU, and  $I_H$  represents reference HC-05.

$$I_T = I_p + I_Q + I_A + I_H \quad (1)$$

$$I_t = 150 \times 10^{-6} A + 20 \times 10^{-3} A + 105 \times 10^{-3} A + 50 \times 10^{-3} A \quad (2)$$

$$I_T = 175,15 \times 10^{-3} A \quad (3)$$

$$I_T = 175,15 mA \quad (4)$$

Having determined the current consumed by the device, its autonomy can be estimated, considering the fact that, to maximize the useful life of the battery, discharges below 80 % of its maximum capacity (2.600 mAh) should be avoided, so the battery can only supply 4/5 of its capacity, that is, 2.080 mAh. In Equations (5) to (8), the calculation of the autonomy of the device in hours is represented by variable  $A_{(h)}$ , and the capacity of the battery is represented by  $C_B$ .

$$A_{(h)} = \frac{80\%(C_B)}{I_T} \quad (5)$$

$$A_{(h)} = \frac{0,8 \times (2600 \text{ mAh})}{175,15 \text{ mA}} \quad (6)$$

$$A_{(h)} = \frac{2080 \text{ mAh}}{175,15 \text{ mA}} \quad (7)$$

$$A_{(h)} = 11,87 \text{ h} \quad (8)$$

### 2.3. Tests

Before carrying out the tests, the participants (students of the TOOLS research hotbed of the AXON research group) were told how the system worked. They were also instructed in how blind people normally use the cane as a support tool in their movements.

During the development of the electronic baton, two types of tests were carried out. The first tests aimed to determine the frequency of movements of the baton to provide a reference to the user to effectively follow the guiding line, starting from the average time with which the user moves the cane from one side to the other. For the tests, all 4 participants were deprived of the sense of vision. They walked with the cane for 4 m marked with a measure tape. The movements of the cane were recorded during the journey with a camera capable of recording in slow motion. The data obtained from this test are presented in Figure 6.

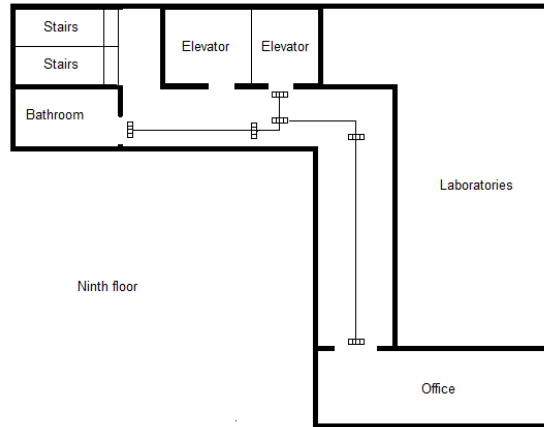
In the second test, three destinations were defined: the AXON research group office, the bathroom, and the elevator, located on the 9th floor of building J of the National Unified Corporation for Higher Education (CUN). The blindfolded participants made 10 timed tours between these destinations with the help of the electronic baton and an assistant. The route diagram is shown in Figure 5, and the timed average time results of the tours are presented in Table II.

## 3. Results

This section presents the results obtained in the tests. The first test tries to determine the frequency with which the user moves the cane from side to side vs. the distance traveled, whose data are presented in Figure 6.

Table II presents the timed average time results of the routes defined for the second test.





**Figura 5.** Diagram of the routes taken during the tests with the help of the electronic baton and an assistant.

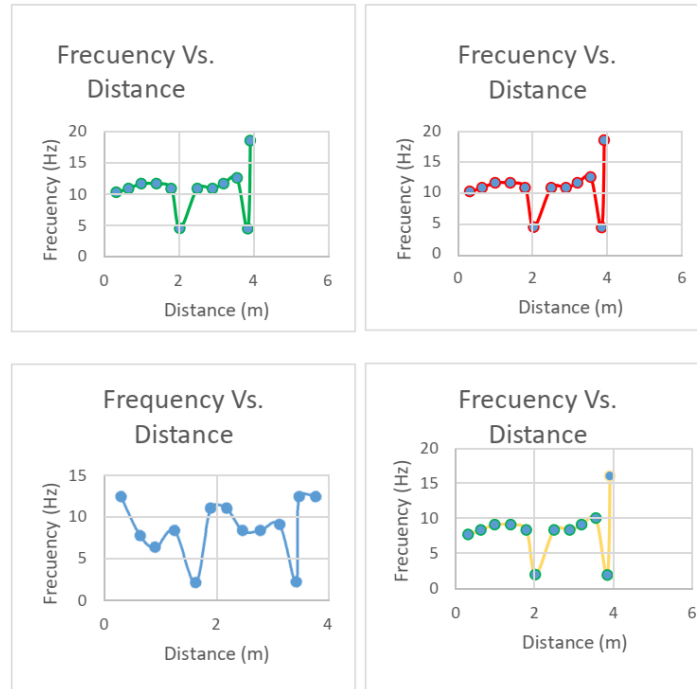
As a result of the entire design, testing, and feedback processes, the electronic baton device was developed, whose electronics are presented in Figure 7, namely the modules and elements described above in the design and modeling section. Finally, the result of this process can be seen in Figure 8, which presents images of the developed prototype.

## 4. Discussion

From Figure 6, it can be seen that there are differences in the distance vs. frequency with which different users move the cane from side to side. Additionally, these frequencies do not appear to be constant. By carefully observing all the graphs, it is made evident that there are important peaks in which said frequency drops notoriously. This is due to the fact that, on the test route, there were potholes on one side of the guiding line, near the 2 and 4 meter marks. We decided not to repeat the test under ideal conditions, since the existence of these potholes represent the possibility of having

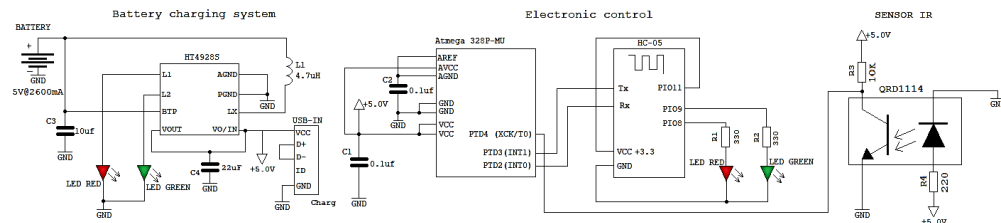
**Table II.** Average of the data acquired through measuring the term on the routes using the guidance system in closed spaces and without using the system with the assistance of a person.

Test #	Origin	Destination	Term	Aid	Distance
3	elevator	bathroom	13,40 s	with cane	7,50 m
4	bathroom	elevator	12,22 s	with cane	7,50 m
2	elevator	Office	44,10 s	with cane	25,50 m
1	office	elevator	58,30 s	with cane	25,50 m
7	elevator	bathroom	6,11 s	human	7,50 m
8	bathroom	elevator	6,13 s	human	7,50 m
6	elevator	bathroom	26,51 s	human	25,50 m
5	office	elevator	27,30 s	human	25,50 m

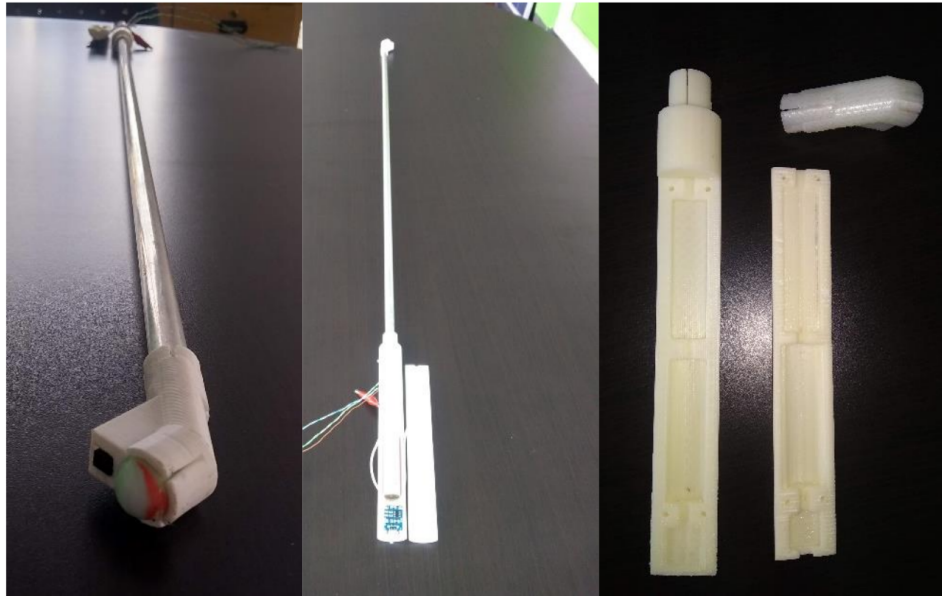


**Figura 6.** Results obtained from testing frequency vs. distance, where the frequency of movement of the cane from one side to the other is analyzed by the distance of 4 different users.

unforeseen events along the routes and present an opportunity to validate the operation of the cane in the presence of imperfections. Therefore, using the frequency with which the user moves the cane from one side to another in order to determine if it was following the guiding line was no longer a possibility, as it had been originally planned. This first observation forced a design change in the way it is verified whether the user is following the guiding line. It goes from detecting an average frequency of movement of the cane and generating a short audible beep when the instantaneous frequency of movement of the cane mat the average frequency, to just detecting the guiding line and generating a short audible beep each time the sensor passes over the line.



**Figura 7.** The image presents on the left and in the center views of the electronic baton prototype, on the right it presents an image of the parts printed on a 3D printer.



**Figura 8.** Schematic diagram of the electronics used in the electronic baton device.

In Table II, it can be seen that the user is able to autonomously follow the routes to different destinations using the electronic baton, although the time used for the route with the cane is longer compared to receiving human assistance. This may be due to the fact that moving around when the environment is unknown generates a feeling of insecurity, whereas, if there is human assistance, the blind person moves at the speed of the human guide. Speaking of the experience with the participants, it could be stated that, as the user becomes familiar with the use of the tool, they feel more comfortable and confident in being able to autonomously reach their destination.

When comparing the developed electronic baton with other devices described in the scientific literature [4]–[6], it can be seen that most of them are focused on the detection of obstacles through the use of various techniques, generally through the implementation of ultrasound sensors. Those that focus on taking users from one place to another use techniques such as GPS, which has an accuracy of 3 meters for civil applications. While this may help guide them, it does not allow guiding the blind safely and autonomously in closed spaces. However, there are solutions for this [12], although they require bulky hardware, which prevents the dimensions of the device from resembling that of the canes normally used as an aiding tool by the blind population, thus limiting its natural use.

As future work, we propose the inclusion of sensors that allow the detection of obstacles while maintaining the shape of the device, so that it retains the closest possible resemblance to the canes normally used by the blind population, as well as generating a tracking function to follow the user's steps to be able to know their location in case they need assistance.

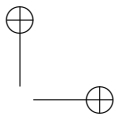
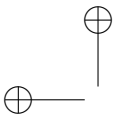
## 5. Conclusions

The device is capable of taking a blind person to their destination within a closed area, providing audible information so that they can know at all times that they are following the guiding lines. Due to the physical characteristics of the device, its use is easy and natural for the visually impaired. Even though, when performing the tests, the time needed to carry out the tours with the device was greater than with the help of a person, the use of the tool provided users with confidence and independence. In turn, natural use of other solutions aimed towards the same objective of guiding blind people indoors is limited due to the volume of hardware.

The components of the baton are easily acquired and affordable, which makes this proposal viable for its implementation in government buildings, such as museums, schools, municipalities, among others, where it is desired to implement technologies that allow the inclusion of people with disabilities.

## Referencias

- [1] Ministerio de Salud y Protección Social, “Análisis de situación de salud visual en Colombia 2016”. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ENT/asis-salud-visual-colombia-2016.pdf> ↑426
- [2] B. Stevenson and J. L. McQuivey, “The wide range of abilities and its impact on computer technology”, *Forrester Research*, 2003. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=18446> ↑426, 427
- [3] B. D. Collantes, “Diseño de un prototipo de un bastón inteligente con sensores para personas con discapacidad visual y física en la carrera de ingeniería en computación y redes”, Thesis, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Manabí, 2020. ↑427
- [4] C. R. Reinoso, “Implementación de un bastón plegable electrónico con radar por ultrasonido y ubicación mediante GPS para personas con discapacidad visual”, Thesis, Universidad Tecnológica Israel, Quito, 2019. Available: <http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/2135> ↑427, 434
- [5] C. R. Rojas, “Implementación de un bastón detector de obstáculos elevados para personas invidentes”, Thesis, Universidad de los Llanos, Villavicencio, 2016. Available: <https://1library.co/document/y49p470z-implementacion-baston-detector-obstaculos-elevados-personas-invidentes.html> ↑427, 434
- [6] O. A. Murillo and C. A. Serna, “Prototipo de bastón inteligente para personas con limitación visual”, Thesis Universidad Católica de Pereira, Pereira, 2017. Available: <https://repositorio.ucp.edu.co/bitstream/10785/4634/4/DDMIST18.pdf> ↑427, 434
- [7] P. Singkhamfu and A. Prasompon, “The Accuracy Enhancement of Consumer-Grade Global Positioning System (GPS) for Photogrammetric and City Mapping Determinations”, *Int. J. Build., Urb., Interior, and Landsc. Tech.*, vol. 14, pp. 81-92, 2019. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/BUILT/article/view/228169> ↑427
- [8] NanJing Top Power ASIC Corp, “Datasheet TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8,”, NanJing Top Power ASIC Corp, 2019. ↑429
- [9] Atmel Corporation, “Datasheet -ATmega328P”, Atmel Corporation, 2015. ↑429
- [10] ITEad Studio, “Datasheet Hc-05 Bluetooth Module”, ITEad Studio, 2010. ↑429
- [11] Fairchild Semiconductor Corporation, “Datasheet QRD1114 Reflective Object Sensor”, Fairchild Semiconductor Corporation, 2008. ↑429
- [12] E. Wise *et al.* “Indoor navigation for the blind and vision impaired: Where are we and where are we going?”, presented at: *Int. Conf. Indoor Position. and Indoor Navig., IPIN*, Sydney, Australia, November 13-15, 2012. doi: [10.1109/IPIN.2012.6418894](https://doi.org/10.1109/IPIN.2012.6418894) ↑434



---

**Arnaldo Andrés González Gómez**

Is an electronic engineer who graduated from the Francisco José de Caldas District University in Bogotá, Colombia. He is the leader of the AXON research group of the National Unified Corporation of Higher Education (CUN), with 3 years of experience performing research teaching duties. He is currently linked as a research professor to the CUN.  
E-mail: arnaldo\_gonzalez@cun.edu.co

---

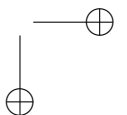
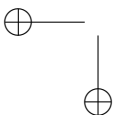
**Yesid Díaz Gutiérrez**

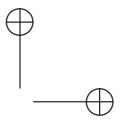
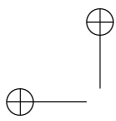
Is a systems engineer with emphasis on software an a specialist in pedagogy and university teaching, with a master's degree in Strategic Management in Information Technology, as well as a Ph.D. student in Computer Science. Professor of self-evaluation of the Systems Engineering program of the CUN, with 20 years of experience in teaching, research, and academic and administrative management of academic programs.  
E- mail: yesid\_diaz@cun.edu.co

---

**Wilson David Flórez Barboza**

Is a computer and systems engineer graduated from the National University in Medellín, Colombia. Specialist in administration of educational informatics, and master of management of educational informatics from the University of Santander UDES, he is currently a researcher professor at the CUN, with 14 years of experience performing undergraduate teaching tasks in different universities of systems engineering and 4 years as a research teacher.  
E-mail: wilson.florez@cun.edu.co





Research

REVISTA  
Ingeniería

## Electronic Device for Satellite Backup of Automatic Vehicle Location Equipment Using the Iridium Network

*Dispositivo electrónico para respaldo satelital de equipos de localización vehicular automática, utilizando la red Iridium*

Hernán Paz Penagos<sup>1</sup>, Néstor Guerrero Rodríguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, (Bogotá, D.C., Colombia)  
Corresponding e-mail: hernan.paz@escuelaing.edu.co

Recibido: 01/06/2020. Modificado: 31/08/2020. Aceptado: 15/09/2020.

### Abstract

**Context:** This paper presents the design and development of an electronic device that operates as a satellite backup channel for automatic vehicle location (AVL) equipment, whose only communication channel is the cellular network.

**Method:** The design, manufacture and assembly of the hardware followed 4 phases, and it was aligned with the IPC 2221 standard. This allowed improving the design experience and guaranteed the correct electrical operation in the final product.

**Results:** The information sent by the developed device corresponds to the data generated by the AVL device, which indicates that the information processing was correctly designed. Additionally, it was possible to obtain a functional and versatile device in which the blocks were correctly integrated; its firmware was designed to receive future updates that improved and expanded its capacity and compatibility with other devices.

**Conclusions:** The final product, which works with the Iridium network, seeks to satisfy the technological requirements of the freight transport sector in Colombia with a low-cost, versatile, and easily integrated solution. The implementation of this type of technologies expands the capacity of tracking mobile assets, even in places where there is no cellular network coverage.

**Keywords:** AVL equipment, satellite backrest, Iridium network

**Acknowledgements:** The authors thank the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito for funding this study.

**Language:** English.

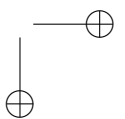
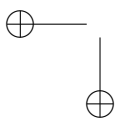
Open access



Cite this paper as: H. Paz-Penagos, N. Guerrero-Rodríguez, "Electronic Device for Satellite Backup of Automatic Vehicle Location Equipment Using the Iridium Network", INGENIERÍA, vol. 25, no. 3, 437-451, 2020.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: [doi:https://doi.org/10.14483/23448393.17076](https://doi.org/10.14483/23448393.17076)



### Resumen

**Contexto:** Este artículo presenta el diseño y desarrollo de un dispositivo electrónico, que funciona como canal de respaldo satelital para equipos de localización vehicular automática (AVL), cuyo único canal de comunicación es la red celular.

**Método:** El diseño, fabricación y ensamblaje del hardware siguió cuatro fases y estuvo alineado con el estándar IPC 2221. Esto permitió mejorar la experiencia del diseño y garantizó el correcto funcionamiento eléctrico en el producto final.

**Resultados:** La información enviada por el dispositivo desarrollado corresponde a los datos generados por el dispositivo AVL, lo que indica que el procesamiento de la información fue diseñado correctamente. Además, fue posible obtener un dispositivo funcional y versátil cuyos bloques se integraron correctamente; su *firmware* fue diseñado para recibir futuras actualizaciones que mejoraran y ampliaran su capacidad y compatibilidad con otros dispositivos.

**Conclusiones:** El producto final, que opera con la red *Iridium*, busca satisfacer las necesidades tecnológicas del sector de transporte de carga en Colombia con una solución versátil, de bajo costo y de fácil integración. Con el uso de este tipo de tecnologías, se amplía la capacidad de rastrear activos móviles, aun en zonas donde no existe cobertura de redes celulares.

**Palabras clave:** equipos AVL, canal de respaldo satelital, red Iridium

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por el financiamiento del estudio.

**Idioma:** Inglés

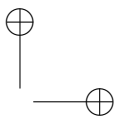
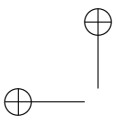
## 1. Introduction

Automatic Vehicle Location (AVL) applications are used to manage, monitor, and track fleets of mobile assets, allowing the user to know their real-time position and status. This is made possible by using different technologies such as the cellular network, web platforms, and the global navigation satellite system (GNSS), among others.

In Colombia, this technology has had a great reception, to the extent that, in recent years, the government has created a series of laws to regulate AVL applications. Some of them are the 180187 resolution, issued on February 18<sup>th</sup>, 2011, by the Ministry of Mines and Energy; decree nr. 723, issued on April 10<sup>th</sup>, 2014 by the Ministry of Commerce, Industry, and Tourism; and resolution nr. 02086, issued on May 30<sup>th</sup>, 2014, by the Ministry of Defense.

The laws mentioned above state that companies related to the transport and mining sectors are required to monitor and track their assets throughout the Colombian territory, even in places where there is no cell network coverage. Several of these companies have installed AVL devices in their assets which only can operate with cellular network coverage (most usually, GSM/GPRS). Thus, companies have two options: (1) to replace their devices or (2) to install a satellite backrest device that expands the communication capacity of their GSM/GPRS equipment.

Therefore, an electronic device was designed and developed to allow AVL equipment to have universal coverage. This device will be useful for AVL equipment that only uses the cellular network as a communications channel.



The Iridium network was selected over the Globalstar network for the development of the device. Despite the fact that both constellations have a reduced satellite footprint (which suggests the same link availability), Iridium operates as a mesh network of 66 interlinked and interconnected satellites at a height of 780 km (less than Globalstar), which results in less delay and better service quality (BER=10<sup>-3</sup>) than Globalstar (BER=10<sup>-2</sup>).

Iridium has a two-way channel, providing a downlink between the space vehicle and the mobile terminal. This feature suggests a user advantage because it allows sending information from the platform to the mobile terminal, which is a fundamental feature of AVL equipment.

Regarding design and operation, the Iridium downlink allows the terminal to access information related to the existing satellites. Furthermore, due to this feature, it allows determining the time in which data transmissions are viable, thus enabling the design of a more energy-efficient mobile terminal. It also includes an ACK, which guarantees message delivery.

On the contrary, Globalstar lacks a downlink feature. It has a single connection channel, allowing only for an upward communication between the mobile terminal and the space vehicle. In order to compensate for the lack of a downstream channel, this network uses a replica system for each message, which leads to additional energy consumption for mobile terminal transmissions.

This article is focused on the device's hardware. The process to design and develop the satellite backrest device is hereby described.

## 2. Theoretical Framework

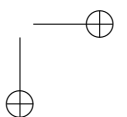
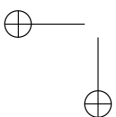
This section presents some related concepts involved in AVL applications.

### 2.1. Description of an AVL application

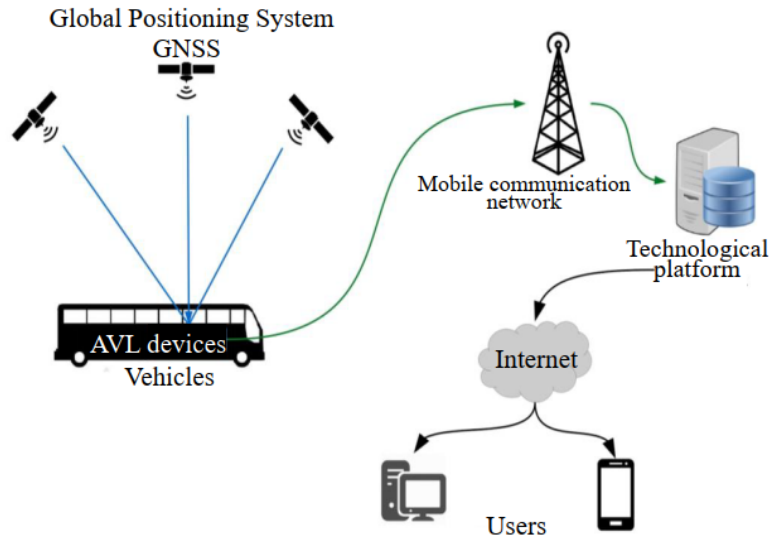
An AVL application is defined by Colombia's Ministry of Transport as "a set of hardware and software that allows access to the geographical location of a vehicle during a determined period of time, as well as capturing another type of physical variables associated with the automobile such as velocity, acceleration, fuel consumption, driver identification, among others" [1].

The architecture of an AVL application has the elements described below:

- **GNSS:** the global navigation satellite system, which provides the geographical location.
- **AVL device:** the main component of these systems.
- **Communications network:** it is used to send information captured from AVL device sensors to the technological platform. The GPRS network is generally used the most.
- **Technological platform:** it is a back-end server, which stores, processes and shows the information sent by the AVL device.







**Figure 1.** General architecture of an AVL application. Source: Colombian Ministry of Transport, 2016.

- **User:** the one who consumes the AVL services for tracking and monitoring mobile assets.

Fig. 1 shows the general architecture of an AVL application.

The term ‘low-orbit satellite’ groups all satellites that orbit the earth in a distance range between 500 and 1500 km. A short distance supposes an advantage for the development of the application, due to its decreased delays. However, these networks have some disadvantages, since each satellite has a smaller coverage area (footprint), which implies highly dynamic topologies [2].

Additionally, an LEO (Low Earth Orbit) satellite network is called a ‘constellation’. These constellations are usually distributed in circular orbital planes, where the satellites are placed evenly [3]. A polar orbit constellation is characterized by the inclination of its orbital planes, which is near 90°. An example of this is the Iridium network.

On the other hand, the constellations with an inclined orbit, also known as Walker constellations, are those that have orbital planes with an inclination of less than 90°, such as the Globalstar network [4].

## 2.2. Iridium network

This network is composed of 66 low-orbit cross-link satellites. The term ‘cross-link’ means that each satellite can communicate with any other satellite in the network, as well as with a terrestrial station named Gateway. This communication is possible even if the satellite has no direct communication with the Gateway [5].

Iridium offers a short-burst-data (SBD) service to transmit messages from a mobile terminal to a computer central. The SBD service is composed of a field application (FA), an Iridium subscriber unit (ISU), the Iridium satellite constellation, and the Gateway SBD subsystem (GSS), which connect through IP socket or email with the vendor application (VA) [6].

### 3. Materials and methods

The methodological design for the development of this research was divided into four phases, which are presented in Fig. 2.

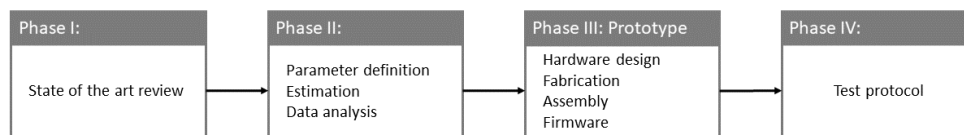


Figure 2. Development methodology.

In order to operate the system correctly, the AVL devices must be configured as described below:

- When the mobile asset is within a cellular coverage area, the AVL device must send data through the network to the back-end server.
- When the mobile asset is out of range, the AVL device must switch to satellite mode, sending the data to the backrest device through a serial port (usually RS232).

The operation criteria mentioned above imply a restriction related to the AVL device that supports the backrest system. The AVL device must allow the configuration described above. Some commercial devices that do this are Syrus, TT8750, and TT8750+, among others.

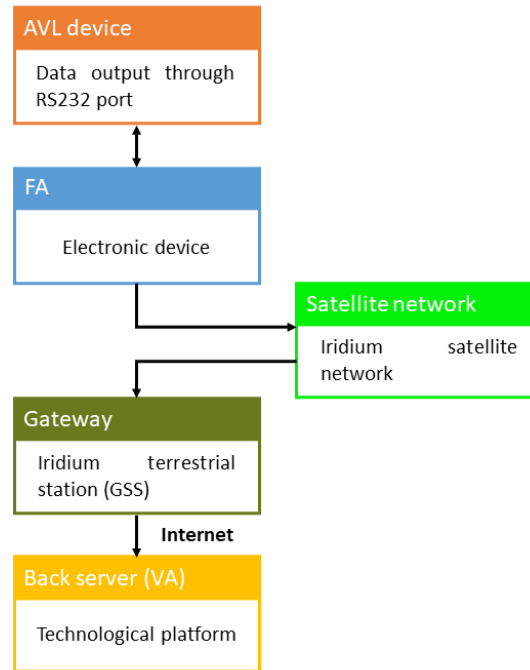
The length of the SBD messages is 10 bytes. For that reason, the device must create a package with the same or less length. The processing block extracts basic information to create a message. The details of this are given in the processing block section [7].

#### 3.1. General architecture

The developed backup device (FA) uses the Iridium SBD service. The FA sends the data received from the AVL device to the low-orbit Iridium satellite through a 9603N (ISU) modem, which is embedded into the FA. The data is received by the Iridium terrestrial station (GSS) and then sent to the technological platform (VA) through the internet. Fig. 3 shows the described process.

#### 3.2. Hardware design

Fig. 4 shows the block diagram of the hardware. The communication lines of all the blocks, except for the power supply, are two-way.



**Figure 3.** General architecture of the backrest system.

The DTE block is the system input and it corresponds to the AVL unit, which extracts the information from the mobile device to be sent to the satellite channel. The function of the reception module is to receive the information from the DTE and adjust the levels to send the data to the processing module. The processing block is responsible for system control. This block processes the information sent by the reception module and transmits it to the transmission module. The function of the transmission block is to adjust the processed information and send it to the satellite channel. Furthermore, the power module is transverse to the other modules, and its function is to provide the energy to the whole system. The energy supply is necessary for the proper functioning of the system.

Each block of the device was designed with the Altium Designer Software, one of the most powerful tools to design printed circuit boards.

### 3.3. Reception block

Its function is to receive the data from the AVL device and send it to the processing block. Its core is an RS232-TTL transceiver, which adjusts the voltage levels to avoid damage to the processing block. Fig. 5 presents the electronic circuit of this block.

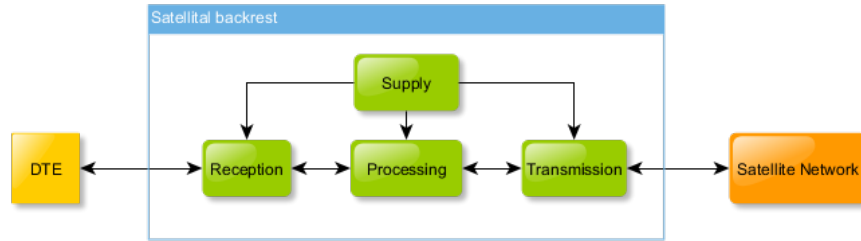


Figure 4. General architecture of the backrest system.

### 3.4. Processing block

This block is the core of the device. It consists of a microprocessor, which receives the data from the reception block, extracts the most important information such as geographic coordinates, event code, velocity, and heading, and creates a package of 9 bytes. After the package is created, this block sends the package to the transmission block and returns an ACK to the AVL device if needed. Fig. 6 shows the electronic circuit of this block.

### 3.5. Transmission block

The function of this module is to send the data package generated by the processing module to the satellite network. The input of these blocks is the TTL signal acquired through a UART port. These signals contain the message to be transmitted. The output is an RF signal in an L band with digital modulation. Fig. 7 presents a block diagram of this module.

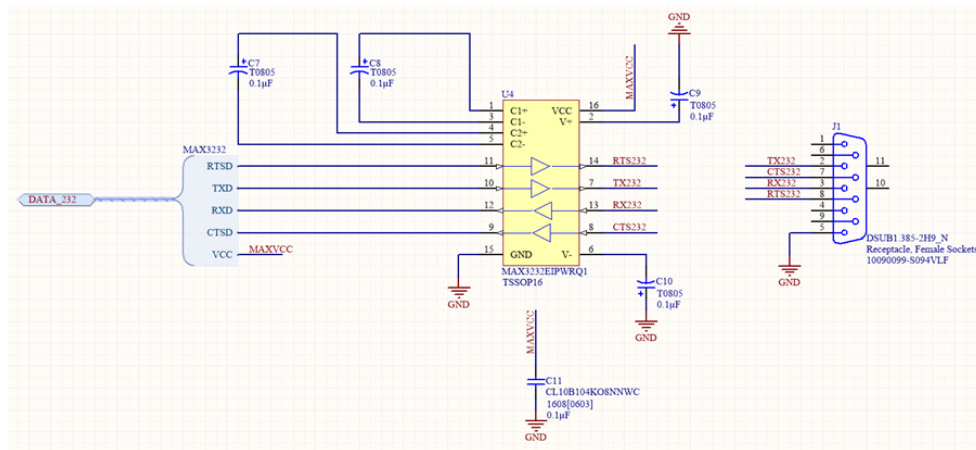


Figure 5. Reception block circuit.

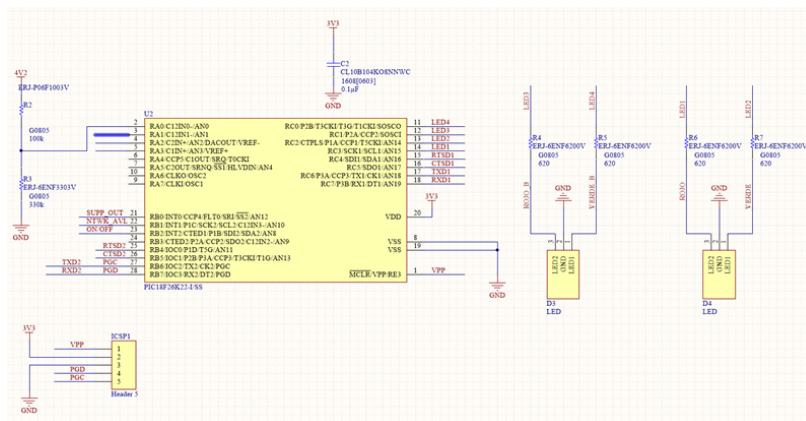


Figure 6. Processing block circuit.

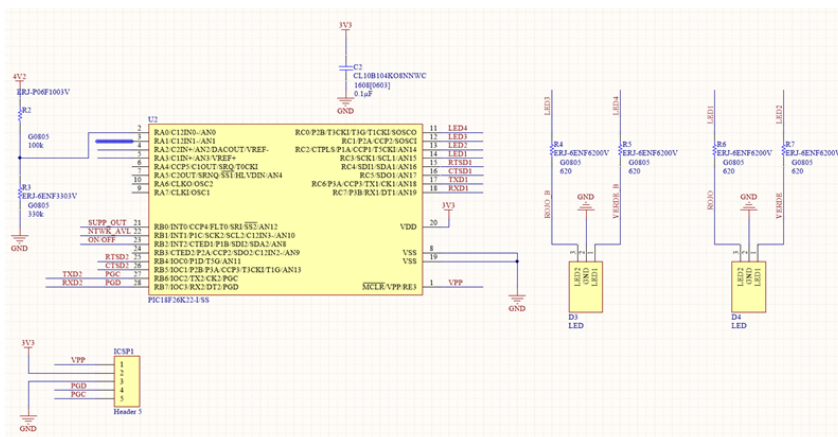


Figure 7. Transmission block circuit.

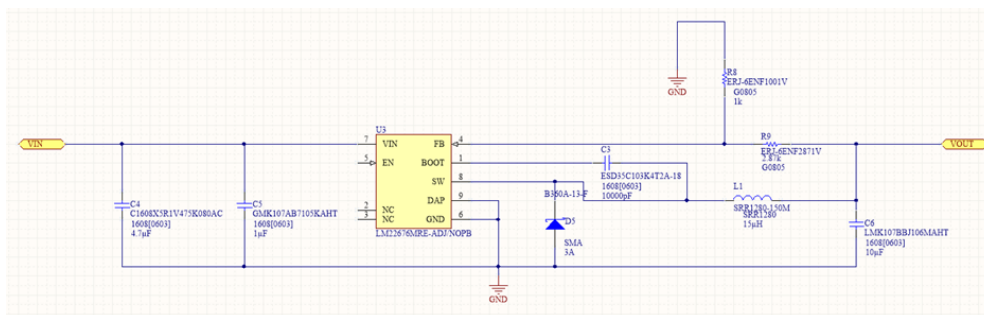


Figure 8. Supply block circuit.

### 3.6. Supply block

This module supplies electrical energy to the whole system. Its design was based on the current demand of the device. Table I describes the current requirements.

**Table I.** Iridium antenna characteristics.

Parameter	Value
Impedance	50 $\Omega$
Gain (Max)	3 dBI
Polarization	RHCP
VSWR (into Iridium band)	1:5:1
VSWR	3:1

To satisfy the electrical demand, the circuit shown in Fig. 8 was designed. The circuit has two sources, one switching and other lineal [10].

Additionally, because the vehicle has an electrical environment with voltage peaks, among other issues, a protection circuit was designed to avoid damage to the device.

### 3.7. PCB design

Once the design of each block of the device was finished, the PCB design began. It was also designed with Altium Designer according to standard IPC 2221 [11]. Fig. 9 shows the final PCB.

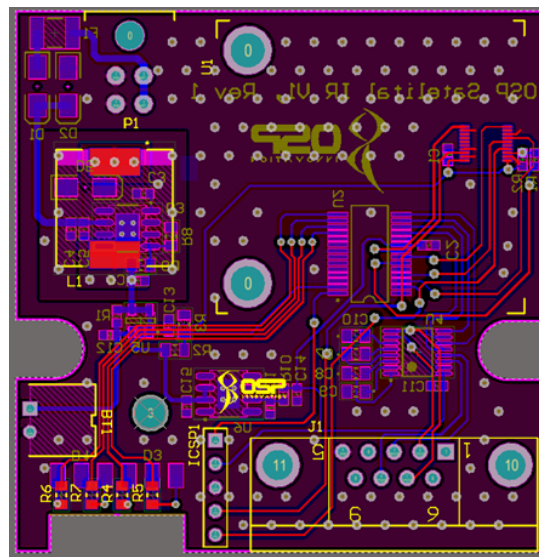


Figure 9. Device PCB design.

### 3.8. Firmware design

The firmware controls all the logic of the device. It was written in C language with the CCS tool. Its logic is described in Fig. 10. The firmware receives the information from the AVL unit to validate it. Afterwards, in the validation process mentioned above, an information package is created which contains the most relevant data, such as message ID, geo-positioning coordinates, speed, and heading. Once the package contains the mentioned data, the information is sent to the transmission module and finally transferred to the satellite channel. Checking of satellites in line of sight is necessary before sending the information to the module. Otherwise, the system stores the information in the internal memory.

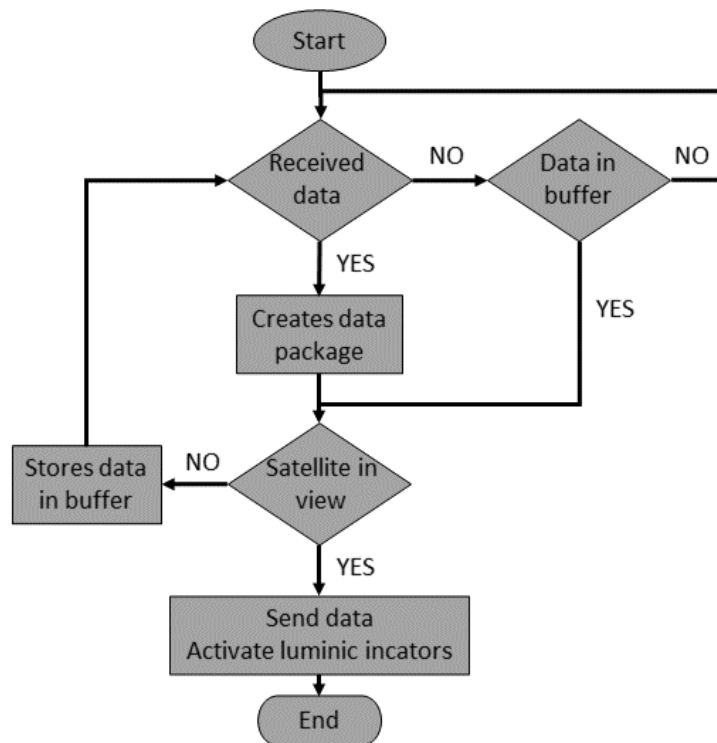


Figure 10. Firmware flow diagram.

## 4. Results

This electronic device allows data transference from the AVL device to a technology platform. It was assembled according to the IPC 2221 standard. Then, the electrical elements were tested to detect any failure (Fig. 11).



**Figure 11.** Developed electronic device.

Fig. 10 shows the final hardware. It was tested in a laboratory, following a hardware compliance test protocol, which registered, step by step, the standard IPC 2221 recommendations for the design, pre-assembly, and assembly of the power supply, microcontroller, display components and output radio frequency interface. Besides, it gives way to assess electrical functioning, the processing of online event information, and the emission of the appropriate antenna output power. The microcontroller was programmed using the developed firmware. This was done in order to carry out the operation test. To program the microcontroller, the following steps were followed:

- An AVL Syrus device was connected to the equipment through the serial port.
- An event was generated in the AVL device.
- The light block of the backrest device confirmed the reception of the message.
- The technological platform received the message and showed the correct position and event on the map.

Once the laboratory tests were successfully finished, the device was installed in a vehicle and tested in a real operation. For this purpose, an active was created in the Adminsat tracking platform, associated with the Syrus AVL and the satellite backup device. Using this platform, the vehicle was tracked for a week. Fig. 12 presents the report history generated by the platform.

As shown in Fig. 12, the vehicle with the satellite device was not moving through cellular coverage areas. Specifically, the vehicle moved within the south Colombian area, and it worked correctly. The received information matches with the transmitted information, and the vehicle location reported by the AVL (latitude, longitude) unit corresponds to the reality.

It would have been desirable to compare the created device with other similar devices. However, this comparison was not possible because the Colombian manufacturers of equipment with AVL applications (DCT, Enfora, Skypatrol, Suntech, Teltonika, etc.) base their data transmissions in 100 % cellular networks (2G) or 100 % satellite networks, which would render it inequitable.



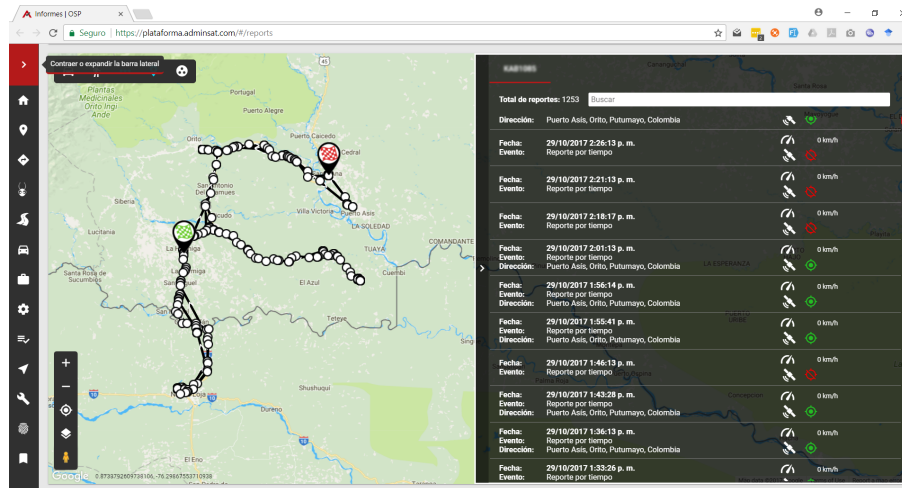


Figure 12. Tacking evidence, of the developed electronic device.

The AVL device does not allow sending data at rates of 9.600, 19.200, 8.400, 57.600, or 115.200 bauds from any of the Units (Syrus, TT8750, and TT8750+). This happens when the mobile is located inside tunnels or in areas with a high vegetation density. Another unfavorable condition was found during the transmission tests; researchers noticed that, when there was no line of sight, it was partially obstructed, or the satellite was not available in its orbit. This happens for antenna elevation angles between 5° and 175°, measured from the observation point and over the observation horizon. Unfortunately, for these scenarios, no information was received on the server.

Table II describes the main technical specifications of the developed device.

Table II. Technical Specifications.

<b>Supply</b>	External 8 ~28V
<b>Temperature</b>	-20 °C~ +70 °C
<b>Serial Port data transfer rate (bps)</b>	9.600/19.200/3.400/57.600/115.200
<b>Operating frequency</b>	1.616-1.626,5 MHz L-band
<b>Type of antenna</b>	External, RHCP
<b>Type of satellite channel</b>	Half duplex
<b>Satellite network</b>	Iridium
<b>Data Reception</b>	IP socket-Email
<b>Dimensions</b>	66,22 mm(L), 67,22 mm(W), 28 mm(H)
<b>Supported AVL devices</b>	SYRUS, TT8750, TT8750+, ANTARES
<b>Current consumption</b>	During transmission 1.2°
<b>Standby</b>	20 mA

As a complement to this research, an economical study was performed. Currently, operators offer only message plans. This means that the user pays a monthly value for a limited quantity of messages, whose cost varies according to the plan. Considering the conditions when sending data, the commercial plan offered by Iridium is more convenient when a high volume of information is must be sent. Thus, 800 messages through the Globalstar network represent a cost equivalent to sending 1.200 messages through the Iridium network. As a conclusion, the proposed electronic device is a convenient technological solution for satellite backup of AVL units because of its low cost (53 USD), low power consumption (1,3 a maximum while active, and 15 mA on idle), small size (96,5×84,8×3,5 mm) and light weight (250 g). In addition, it does not require a subscriber identity module (SIM card).

## 5. Discussion

The device was able to communicate with other equipment such as the Syrus, TT8750, and TT8750+ AVLS at data transmission rates of 9.600, 19.200, 3.400, 57.600, and 115.200 bauds. The device correctly interprets the information related to the measurement variables and/or geolocation of mobile assets sent by AVL equipment. Additionally, it extracts the longitude, latitude, speed, heading, altitude, temperature, humidity, and code or identifier of the reporting event. It also configures the pattern, programs the commands, and sends the message to the technological platform. Previous functions are carried out by means of a satellite link with an effective isotropic radiated power: EIRP of 18 dBm +/- 2 dB.

Furthermore, the device correctly indicates its internal operation state to the user through LEDs, as well as allowing power inputs between 7 and 24 VDC. Information adjustment in the transmitter and its recuperation in the receptor was possible through communication protocols, implemented with different programming languages such as Java, Python, C, Django Framework, and Ajax web development techniques. Besides, for the mentioned development, environmentally friendly management of resources was carried out. Hence, electronic waste was reduced by reusing existing GPRS modems.

Mobile asset operation links at low microwave frequencies (L sub-band) with low earth orbit satellite networks (LEO) are justified by the power limitation in the terminal, a reduced latency (almost negligible of a few hundredths of a second), low losses (by atmospheric absorption and rain attenuation of the order of 0,0001). These conditions are presented for an electromagnetic wave with circular polarization to the right, at a frequency of 1611 GHz and a reduced coverage area (footprint), which implies highly dynamic typologies.

Additionally, it is important to remark that, for this project, the electronic device was designed according to the recommendations of IPC standard 2221. The use of this standard improves the design experience and guarantees correct electrical operation in the final product.

The electronic device can be improved as follows: the firmware can be optimized through the use of algorithms that allow sending more information in the same amount of bytes; and the security of the hardware can be improved, with additional protections to avoid damage due to overvoltage.

## 6. Conclusions

The information sent by the developed device corresponds to the data generated by the AVL device. This indicates that the processing of the information was correctly designed. Therefore, the block integration was also correct, and a functional device was thus obtained. The developed device is versatile; its firmware was designed to receive future updates, which enhances its capacity and compatibility with other devices. Designing the device according to IPC standard 2221 improved the experience and guaranteed the correct electrical operation of the final product.

## References

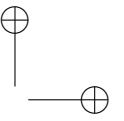
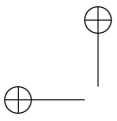
- [1] Ministerio de Transporte. Concepto de operaciones - dispositivo AVL, 2016. [Online]. Available: <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=14648> ↑439
- [2] . Wang, L. Lei, and Z. Mingtian, "Topological dynamics characterization for LEO satellite networks", *Comp. Net.*, vol. 51, no. 1, pp. 43-53, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.04.010> ↑440
- [3] T. Henderson and R. Katz, "Network simulation for LEO satellite networks", presented at *18th AIAA Int. Comm. Sat. Sys. Conf. (ICSSC)*, Reston, VA, USA, 2000, pp. 10-14. <https://doi.org/10.2514/6.2000-1237> ↑440
- [4] T. Henderson, "LEO Satellite Networks", in *Wiley Encyclopedia of Telecommunications*, J.G. Proakis, Ed., Hoboken, NJ, USA. Wiley & Sons Inc., 2003. <https://doi.org/10.1002/0471219282.eot187> ↑440
- [5] Iridium, The Global Network: Ground Infrastructure. Iridium's extensive, interconnected ground network provides multiple layers of redundancy and back-up systems for all critical functions to ensure high network reliability. Iridium Communications Inc.; 2012. [Online]. Available: <https://apollosat.com/intel/iridium-networks-ground-infrastructure/> ↑440
- [6] Iridium, The Global Network: Satellite Constellation. Iridium's cross-linked LEO constellation architecture provides multiple layers of resiliency and redundancy to provide industry-leading network reliability, *Iridium Communications Inc.*, 2012. [Online]. Available: <https://apollosat.com/intel/iridium-networks-groundinfrastructure/> ↑441
- [7] Iridium Communications Inc., "Iridium 9603(N) SBD Transceiver, Developer's Guide", Rev 2.1., Iridium Communications Inc., McLean, VA, USA, 2012. ↑441
- [8] Iridium Communications Inc., "Iridium 9603N and 9602N SBD Transceiver Antenna Connections", Iridium Communications Inc., McLean, VA, USA, 2012. ↑
- [9] Iridium Communications Inc., "Iridium Short Burst Data Service, Developer's Guide. Release 3.0.", Iridium Communications Inc., McLean, VA, USA, 2012. ↑
- [10] ICAO "Technical Manual for Iridium Aeronautical Mobile Satellite (Route) Service", Draft v1.1, ICAO, Montreal, Canada, 2006. ↑445
- [11] *Generic Standard on Printed Board Design*, IPC -2221. Bonn, Germany, 1998. ↑445

### Paz-Penagos, H.

Received his Ph.D. degree from the National Pedagogical University of Colombia in 2012. He graduated in electronic engineering from the District University Francisco José de Caldas and received his master's degree from the same university.

He currently Works at Escuela Colombiana de Ingeniería JULIO GARAVITO. During the past 20 years, his research has been centered on various topics of digital communications, antennas, including analysis, design, development, measurement, and propagation and radiation aspects of terrestrial and space-based communication, wireless, mobile, satellite, and telecommunications.

As professor and researcher, he has directed several research projects and published more than 30 scientific papers and 5 research books on communications systems. In addition, he has researched in teaching methods and pedagogic theory. <http://orcid.org/0000-0002-2692-1989>, ID Scopus: 55344136500 and Google Scholar:



---

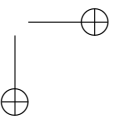
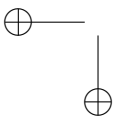
H. Paz-Penagos • N. Guerrero-Rodríguez

<https://scholar.google.com/citations?user=8YmHJ6EAAAAJ&hl=en>  
Email: herman.paz@escuelaing.edu.co

---

**Guerrero-Rodríguez, N**

Received his MSc in Electronic Engineer from Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia. He is an electronic engineer from el Bosque University, Colombia.  
E- mail: nestor.guerrero@mail.escuelaing.edu.co





## Instrucciones para los Autores

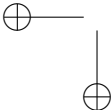
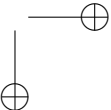
### Introducción

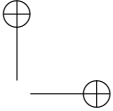
La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

### Clasificación de los artículos

La clasificación de un artículo científico dependerá de la naturaleza del nuevo conocimiento que reporte, lo que nos lleva a plantear la siguiente tipificación:

- **Investigación:** son aquellos que abordan una pregunta sobre un aspecto disciplinar teórico o aplicado, usualmente mediante un estudio científico del comportamiento de un fenómeno o una situación bajo ciertas condiciones de control.
  - **Metodología:** estudios enfocados en presentar un nuevo método de solución para una categoría particular de problemas, demostrando resultados favorables en comparación con el estado del arte o de la técnica. Son investigaciones específicamente dedicadas a validar las bondades y desventajas del método que proponen o a realizar caracterizaciones comparativas de varios métodos en dominios disímiles o inexplorados.
  - **Revisión:** los que presentan análisis críticos, sistemáticos, delimitados y exhaustivos, sobre los avances, tendencias, resultados positivos y negativos, vacíos y futuras rutas de investigación encontrados en el actual estado del arte o de la técnica.
  - **Perspectiva:** aquellos que, recurriendo a fuentes bibliográficas originales y con un discurso argumentativo y controversial, cuestionan el actual estado del arte o de la técnica, proponen visiones alternativas a las corrientes de pensamiento dominantes, critican la vanguardia de la disciplina o instigan un viraje hacia tópicos de investigación abandonados o desentendidos por la comunidad científica. Usualmente más que una reflexión personal, buscan establecer una posición colectiva (de comunidad científica), sustentada en una discusión que combina introspectiva, retrospectiva y prospectiva sobre el asunto en cuestión.
  - **Reporte de Caso:** los que buscan divulgar un hallazgo novedoso encontrado durante o posterior a un caso particular de desarrollo tecnológico, que eventualmente podría generalizarse mediante una investigación más amplia (aplicada a más casos) y que por lo tanto ameritan ser conocidos por la comunidad para convocarla en tal sentido. Más que
- 
- 



enfatar en el desarrollo tecnológico o innovación per sé, se enfocan en caracterizar el conocimiento descubierto en el caso de estudio respectivo.

- **Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado:** son las únicas categorías que no reportan nuevo conocimiento, sino que discuten temas de interés para la Revista, para su línea editorial o para su comunidad, con un carácter de opinión informada.

Para una mayor información de la explicación y/o diferencias de la anterior clasificación los invitamos a visitar el siguiente enlace “Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA”.  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11131/12114>

## Procedimiento para el envío de artículos

Los autores deberán enviar al Editor los siguientes documentos mediante la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista:

- Carta de presentación y originalidad del artículo: el formato de la presente carta se puede descargar en el siguiente enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/11961> (Formato PDF)  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11486/12242> (Formato Word)

La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que aceptan las normas de publicación de la Revista.

- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

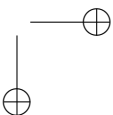
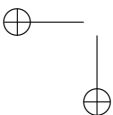
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

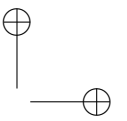
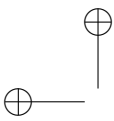
- Debe tener al menos título de maestría.
- Pertener a una institución diferente a la de los autores.
- Haber realizado publicaciones en los últimos tres años.

Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica: [revista\\_ing@udistrital.edu.co](mailto:revista_ing@udistrital.edu.co)

- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5091/6711>

Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>



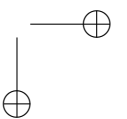
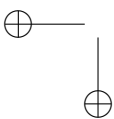


### **Aspectos a tener en cuenta**

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente el artículo con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una, dos o más veces después de presentar el artículo.
- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

### **Derechos de autor**

El contenido completo de la licencia Creative Commons, bajo la cual se resguardan los derechos de autor de aquellos que publican en la Revista INGENIERÍA, puede consultarse en: Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0.





## Instructions for authors

### Aim and scope

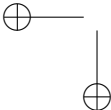
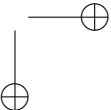
INGENIERÍA Journal is a scientific publication with a periodicity published every four months by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Its main goal is to disseminate and discuss advances in research and development in the different areas of engineering through the publication of original unpublished papers.

The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

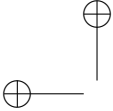
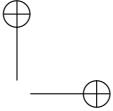
Submitted papers are double-blind peer-reviewed by at least two experts in the field, before being qualified as a candidate to be published. The Editorial Board grounds its acceptance decision on the basis of the recommendations given by the experts and the fulfillment of the editorial policies of the Journal. All papers submitted to INGENIERÍA Journal must be unpublished and not submitted to publication to other journal, although papers previously published in conference proceedings may be considered if substantial extensions are included.

### Types of papers

Papers published in INGENIERIA Journal are classified according to the nature of the new knowledge it reports, as follows:

- **Research:** These are papers that address a question about a theoretical or applied disciplinary aspect, usually through a scientific study of the behaviour of a phenomenon or a situation under certain control conditions.
  - **Methodology:** These are papers focusing on presenting a new method of solution for a particular category of problems, demonstrating favorable results compared to the state of the art or technique. They are investigations specifically dedicated to validate the advantages and disadvantages of the method proposed or to perform comparative characterisations of several methods in dissimilar or unexplored domains.
  - **Review:** These are papers that present critical, systematic, delimited and exhaustive analyzes on the progress, trends, positive and negative results, gaps and future research routes found in the current state of the art or technique.
  - **Perspective:** These are papers that, using original bibliographical sources and argumentative and controversial discourse, question the current state of art or technique, propose alternative visions to dominant currents of thought, criticise the vanguard of the discipline or call for the attention towards research topics abandoned or disregarded by the scientific community. Usually more than a personal reflection, they seek to establish a collective (scientific community) position, based on a discussion that combines introspective, retrospective and prospective on the subject in question.
  - **Case Report:** These are papers intending to disclose a novel finding found during or after a particular case of technological development, which could eventually be generalised by a more extensive investigation (applied to more cases) and which therefore deserve to be known by the community. In other words, rather than emphasising on technological development or innovation per se, they focus on characterising preliminary knowledge discovered in the respective case study.
- 
- 



- 
- 
- **Editorials:** Letters to the Editor, Guest Article: These are the only contributions that do not report new knowledge, but discuss topics of interest for the Journal, for its editorial line or for its community, with an informed opinion style.

## Procedure for the submission of papers

Authors should submit to the Editor the following documents using our Open Journal System (OJS) platform:

- Cover letter and originality statement: a template can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5087/11961> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/11486/12242> (Word format)

- The manuscript formatted according to the template and style of the instructions to authors:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/4979/11816> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5233/11815> (Word Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/9539/10775> (Latex Format)

- (Optional) Suggestions of two candidate experts for peer review, complying with:

– Must have a PhD. Degree

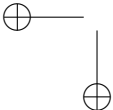
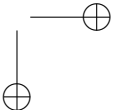
– Must belong to an institution other than the authors’

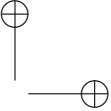
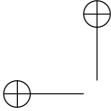
– Have publications in recognised journals in the last two years

- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5091/6711>

## Additional considerations

- Recommended paper length is ten (10) pages. If authors require more pages, they should inform the Editor in advance during the submission process.
  - The result of the review process and the reviewers comments would be notified to the authors through the OJS platform and by email to the correspondence author. The result can be “Major correction”, “Minor corrections” or “Rejected”. When corrections are required, authors should resubmit a corrected anonymous manuscript and a companion document explaining the changes made in reply to what comments. Usually, a submitted manuscript would undertake at least two rounds of review. Statistics of average review and production times and other Journal indicators can be seen at:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/index>
  - When a submission does not meet the conditions defined for the journal, the Editorial Committee may decide not to publish it. In this case, the authors will be notified of the decision within two (2) weeks from the date of submission.
- 
- 



## Copyright and publishing cost

INGENIERÍA Journal distributes the full content of its printed and digital version under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License. No publication costs are charged to the author or author's institutions, nor any payment are made to expert peer reviewers or associated or adjunct editors. INGENIERÍA Journal is funded by Universidad Distrital Francisco José de Caldas, its School of Engineering and its Central Research Office.

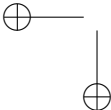
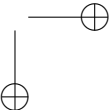
## Code of good conduct in scientific publishing

INGENIERÍA Journal advocates and defends the universal principles of good conduct in scientific publication, in particular, those referring to respect for the community, respect for the selfless and voluntary work of peer reviewers and editors, as well as respect to intellectual property. Regarding the latter, INGENIERÍA Journal does not tolerate behaviours related to plagiarism of previously published material and strives to honor to the maximum extent the copyrights and patents and reproduction rights. Likewise, the Journal seeks to observe the moral rights of third parties, in addition it will establish the necessary processes to avoid and to resolve the possible conflicts of interest that can exist in the publications.

## Inappropriate behaviour not tolerated by the journal

1. Wrongly addressed submission intended to other journal different to INGENIERIA Journal.
2. Plagiarism or self-plagiarism.
3. Simultaneous submission of a manuscript to several journals.
4. Unjustified withdraw of a submitted manuscript due to unfavourable reviews.
5. Unjustified abandonment of submission at any stage of the process: verification of submission conditions, peer-review process or layout and final proof adjustments.

## Penalties for inappropriate behaviour

1. Official communication sent to the authors indicating the misconduct, requesting a letter of apology addressed to the Editorial Committee, Scientific and/or peer reviewers.
  2. Notification sent to the Colombian Network of Engineering Journals (Red Colombiana de Revistas de Ingeniería) reporting the case of misconduct with evidences.
  3. Official communication sent to author's affiliated or financing institutions informing about the misconduct.
  4. Retraction of the paper in case it has been published, notifying this decision publicly in the editorial pages of the Journal and in an official letter addressed to the entities of institutional affiliation of the authors.
  5. Application of a publication veto to the authors in the Journal during a period determined by the Editorial Board according to the seriousness of the misconduct.
  6. Notification of the case and the result of the investigation to the competent authorities, in case the good will of the Universidad Distrital FJC or the INGENIERIA Journal is compromised.
- 
- 



## **Procedure in case of suspicion of plagiarism and duplicate publication**

INGENIERIA Journal will follow the guidelines established by the Publications Ethics Committee (COPE) to handle unethical issues or behaviours:

Suspicion of plagiarism in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20A.pdf>

Suspicion of plagiarism in a published paper

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B.0.pdf>

Suspicion of duplicate publication in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20A.pdf>

Suspicion of a duplicate publication in a published paper

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B.0.pdf>

For more information on non-ethical conduct and/or penalties please see:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/7784/11818>

